TUGAS AKHIR – TE 141599

ANALISIS DAN MITIGASI BAHAYA ARC FLASH PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE INDONESIA

Yahya Nurhidayat
NRP 2212100070

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Sjamsjul Anam, ST., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

FINAL PROJECT – **TE 141599**

ANALYSIS AND MITIGATION ARC FLASH HAZARDS IN ELECTRICAL SYSTEM OF PT. LINDE INDONESIA

Yahya Nurhidayat
NRP 2212100070

Advisors
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Sjamsjul Anam, ST., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

ANALISIS DAN MITIGASI BAHAYA ARC FLASH PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE INDONESIA

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,	Dosen Pembimbing II,
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.	Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP. 19660318 199010 1 001	NIP. 19630725 199003 1 002

SURABAYA
JANUARI, 2016

ANALISIS DAN MITIGASI BAHAYA ARC FLASH PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE INDONESIA

Nama Mahasiswa	**:**	**Yahya Nurhidayat**
NRP	**:**	**2212 100 070**
Dosen Pembimbing	**:**	**1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**
		2. Ir.Sjamsjul Anam,MT.

Abstrak

Dalam perhitungan yang berhubungan dengan potensi bahaya *arc flash* bergantung pada proteksi arus lebih untuk menghilangkan kondisi saat diberi gangguan. Efektivitas berbagai perangkat ditentukan oleh *fault clearing time* (FCT) terkait dengan gangguan arus maksimum yang ada untuk setiap lokasi sistem. Industri komersial mulai melakukan prosedur pelabelan arc flash dan mulai mengenali pencegahan *arc flash* sebagai bagian dari program safety, perhitungan *current method* memungkinkan untuk menghitung *incident energy* (cal/cm²) terkait dengan gangguan maksimum tiga phasa. Kesalahan terbanyak adalah besaran arus kurang dari besaran arus tiga phasa maksimum. Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas perhitungan energi, cara mengurangi energi, *protection boundary*, pemilihan *personal protective equipment* (PPE) saat terjadinya *arc flash* pada sistem kelistrikan PT. Linde Indonesia analisis dilakukan ditegangan menengah**.**

Kata kunci : *Fault clearing time, Incident Energy* dan *Resetting Rele*

ANALYSIS AND MITIGATION ARC FLASH HAZARDS IN ELECTRICAL SYSTEM OF PT. LINDE INDONESIA

Name of Student	:	**Yahya Nurhidayat**
NRP	:	**2212 100 070**
Advisor	:	**1. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**
		2. Ir.Sjamsjul Anam,MT.

Abstract

In calculation of the potential hazards associated with arc flash depends on overcurrent protection to eliminate interference conditions. The effectiveness of the various devices is determined by fault clearing time (FCT) associated with disorders of the maximum available current for each location system. Commercial industry began to perform arc flash labeling procedures and begin to recognize the arc flash prevention as part of the safety program, the current calculation method makes it possible to calculate the incident energy (cal / cm²) associated with the maximum three-phase disorder. Most errors are the current magnitude less than the maximum amount of three-phase current. In this final project will be discussed energy calculations, how to reduce energy, protection boundary, the selection of personal protective equipment (PPE) when the arc flash on the electrical system PT. Linde Indonesia analyzes were performed in medium voltage.

Keywords *: Fault clearing time, Incident Energy dan Resetting Relay*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul :

ANALISIS DAN MITIGASI BAHAYA ARC FLASH PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE INDONESIA

Tugas akhir ini diajukan guna memenuhi persyaratan kurikulum pada tahap akhir untuk menyelesaikan program studi Strata-1 pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang masih memperkenankan kepada penulis kesempatan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT. selaku dosen pembimbing.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS.
5. Seluruh rekan-rekan mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro ITS.

Adapun saran dan kritik yang bersifat membangun sangat kami harapkan, demi tercapainya kemajuan yang lebih baik dimasa depan. Demikian semoga ini menjadi manfaat bagi semua.

Surabaya, Desember 2015
Penulis.

DAFTAR ISI

HALAMAN

HALAMAN JUDUL
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xiii

BAB 1 Pendahuluan 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Permasalahan 1
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Tugas Akhir 2
1.5 Metodologi 2
1.6 Sistematika Penulisan 3
1.7 Relevansi 3

BAB 2 Sistem Pengaman Tenaga Listrik Dan Busur Api 5
2.1 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik 5
2.1.1 Gangguan Beban Lebih 5
2.1.2 Gangguan Hubung Singkat 5
2.2 Rele Pengaman Sistem Tenaga Listrik 8
2.2.1 Prinsip Kerja Rele Pengaman 8
2.2.2 Konsep Dasar Daerah Pengamanan Rele 8
2.3 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*) 9
2.3.1 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih 9
2.3.2 Macam-macam Rele Arus Lebih 11
2.3.2.1 Rele Arus Lebih Waktu Invers 11
2.3.2.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu 12
2.3.2.3 Rele Arus Lebih Waktu Instan 13
2.3.3 *Setting* Rele IDMT 14
2.4 Rele Differensial 15

2.4.1 Rele Differensial *High Impedance* 17
2.4.2 *Setting* Rele Differensial *High Impedance* 18
2.5 Busur Api (*Arc Flash*) 19
2.5.1 *Arcing Current* 19
2.5.2 *Incident Energy* 20
2.5.3 *Flash Protection Boundary* 21
2.5.4 *Lee Method* 22
2.5.5 Pengelompokan Kategori Energi Busur Api 23

BAB 3 Sistem Kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik 27
3.1 Sistem Kelistikan PT. Linde Indonesia Gresik 27
3.2 Sistem Pembangkitan PT. Linde Indonesia Gresik 27
3.3 Sistem Distribusi PT. Linde Indonesia Gresik 28
3.4 Beban di PT. Linde Indonesia Gresik 30

BAB 4 Simulasi dan Analisa 33
4.1 Permodelan Sistem Kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik 32
4.2 Analisa Energi Busur Api pada Kondisi Eksisting 32
4.3 *Resetting* pengaman Fasa 44
4.3.1 Rele Pengaman Fasa Tipikal 1 45
4.3.1.1 *Resetting* Tipikal 1 46
4.3.2 Rele Pengaman Fasa Tipikal 2 49
4.3.2.1 *Resetting* Tipikal 2 50
4.3.3 Rele Pengaman Fasa Tipikal 3 53
4.3.3.1 *Resetting* Tipikal 3 55
4.3.4 Rele Pengaman Fasa Tipikal 4 57
4.3.4.1 *Resetting* Tipikal 4 59
4.4 Nilai Energi Busur Api dengan Data *Resetting* 60
4.5 Perbandingan Nilai Energi Busur Api 69
4.6 Perhitungan *Protection Boundary* 72
4.7 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) 77
4.7.1 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 1 77
4.7.2 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 2 78
4.7.3 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 3 79
4.7.4 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 4 81

4.8 Pembuatan Label untuk tiap-tiap Tipikal 83
4.8.1 Pembuatan Label pada Tipikal 1 83
4.8.2 Pembuatan Label pada Tipikal 2 84
4.8.3 Pembuatan Label pada Tipikal 3 85
4.8.4 Pembuatan Label pada Tipikal 4 86

BAB 5 Penutup
5.1. Kesimpulan 89
5.2. Saran 90

DAFTAR PUSTAKA 93
BIODATA PENULIS 95

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1 Gelombang Arus Hubung Singkat 6
Gambar 2.2 Pembagian Zona Pengaman 8
Gambar 2.3 Karakteristik Kurva *Invers* pada Standar ANSI 11
Gambar 2.4 Karakteristik Kurva *Invers* pada Standar IEC 12
Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu 13
Gambar 2.6 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu *Instant* 13
Gambar 2.7 Kombinasi IDMT dengan Rele Arus Lebih Waktu Tertentu 14
Gambar 2.8 Rele Differensial Keadaan Normal 15
Gambar 2.9 Rele Differensial Keadaan Gangguan Eksternal 16
Gambar 2.10 Rele Differensial Keadaan Gangguan Internal 16
Gambar 2.11 Skema Rele Differensial High Impedance 17
Gambar 2.12 *Arc Flash Label* 25
Gambar 3.1 *Single Line Diagram* PT. Linde Indonesia Gresik 32
Gambar 4.1 Tipikal yang Diambil Untuk *Resetting* 44
Gambar 4.2 Rangkaian tipikal 1 45
Gambar 4.3 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 1 46
Gambar 4.4 *Time-Current Curve resetting* dari tipikal 1 47
Gambar 4.5 Penambahan rele *differential* pada bus 11 KV BUS-1 tipikal 1 48
Gambar 4.6 Rangkaian tipikal 2 49
Gambar 4.7 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 2 50
Gambar 4.8 Penambahan rele *differential* pada bus 11 KV BUS-2 tipikal 2 51
Gambar 4.9 Penambahan rele *differential* pada bus BUS-0214 tipikal 2 51
Gambar 4.10 *Time-Current Curve* dari *resetting* dari tipikal 2 52
Gambar 4.11 Rangkaian tipikal 3 53
Gambar 4.12 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 3 54
Gambar 4.13 Penambahan rele *differential* pada bus 11 KV BUS-3 tipikal 3 55
Gambar 4.14 *Time-Current Curve resetting* dari Tipikal 3 56
Gambar 4.15 Rangkaian tipikal 4 57
Gambar 4.16 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 3 58
Gambar 4.17 *Time-Current Curve resetting* dari tipikal 3 59

DAFTAR TABEL

HALAMAN

Tabel 2.1 Koefisien Invers Time Dial 10
Tabel 2.2 Spesifikasi Rele Berbasis Analog..... 11
Tabel 2.3 Koefesien Invers Time Dial 15
Tabel 2.4 Faktor untuk peralatan dan tingkat tegangan..... 21
Tabel 2.5 *Typical Bus Gaps* 22
Tabel 2.6 *Typical Working Distances* 22
Tabel 2.7 *Protective Clothing Characteristics* 23
Tabel 3.1 Data Pembangkit di PT. Linde Indonesia Gresik 27
Tabel 3.2 Data Bus di PT. Linde Indonesia Gresik 28
Tabel 3.3 Data Transformator di PT. Linde Indonesia Gresik 30
Tabel 3.4 Data Beban Motor di PT. Linde Indonesia Gresik 30
Tabel 3.5 Data Beban *lump* di PT. Linde Indonesia Gresik 31
Tabel 4.1 Data bus untuk perhitungan energi busur api kondisi eksisting..... 34
Tabel 4.2 Data bus untuk perhitungan energi busur api kondisi *resetting* 60
Tabel 4.3 Energi busur api data eksisting..... 69
Tabel 4.4 Energi busur api data *resetting* 70
Tabel 4.5 Energi busur api data *resetting* dan penambahan rele differnsial 71
Tabel 4.6 *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 1 77
Tabel 4.7 *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 2 79
Tabel 4.8 *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 3 79
Tabel 4.9 *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 4 81
Tabel 4.10 Label pada Tipikal 1..... 84
Tabel 4.11 Label pada Tipikal 2..... 84
Tabel 4.12 Label pada Tipikal 3..... 85
Tabel 4.13 Label pada Tipikal 4..... 86

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Linde Indonesia merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang *supplaying* gas di Indonesia. Pada PT. Linde Indonesia perlu dilakukan analisi arc flash khususnya pada switchgear tegangan menengah. Arc flash adalah akibat dari pelepasan energi yang cepat disebabkan oleh arcing fault antara fasa bus bar satu dengan yang lain, netral atau ground. Ketika sebuah arc flash terjadi, suhu bisa mencapai hingga 35.000 derajat Fahrenheit. Ini adalah 4 kali suhu pada permukaan matahari.[1][2]

Studi short circuit dan studi koordinasi diperlukan dalam analisis arc flash. Hasil perhitungan *arc flash* didapat dari perhitungan nilai *fault arching current* yang didapat melalui studi *short circuit*, *clearing times* dan studi koordinasi peralatan proteksi arus lebih. Tujuan dari analisis ini untuk menentukaninsiden energi yang berpotensi hadir selama peristiwa arc flash serta lama waktu dari terjadinya energi *arc flash*. Simulasi dilakukan dengan bantuan software. Dari hasil analisa di atas diharapkan syarat dari kategori besarnya energi *arc flash* dapat terpenuhi pada sistem kelistrikan industri, dengan demikian dicapai *setting* dan besarnya energi yang memenuhi standart NFPA 70 E untuk memitigasi bahaya arc flash dapat dilakukan dengan melakukan *setting* ulang khususnya pada *over current relay* yang dapat menghindarkan pekerja terkena dampak bahaya serta peralatan-peralatan kelistrikan pada industri tersebut terhindar dari kerusakan dan kebakaran.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Berapa besar energi *arc flash* pada tiap-tiap *switchgear* tegangan menengah di PT. Linde Indonesia site Gresik.?
2. Berapa lama durasi *arc flash* pada tiap-tiap *switchgear* tegangan menengah di PT. Linde Indonesia site Gresik?
3. Alat pelindung diri apakah yang tepat untuk alat perlindungan diri (PPE) terhadap *arc flash* yang terjadi?
4. Pembuatan label peringatan pada tiap-tiap electrical room yang berdasarkan durasi dan energi dari *arc flash*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada Tugas Akhir ini meliputi:

1. Analisis pada Tugas Akhir ini hanya pada bus *switchgear*
2. Alat pelindung diri hanya untuk kategori *arc flash* sesuai standar NFPA 70E.
3. Analisis yang dilakukan dibandingkan dengan hitungan manual.
4. Label bahaya dibuat melalui software bantu yang sama dengan analisa *arc flash*.
5. *Setting* rele hanya OCR (*over current relay*)

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui besar energi *arc flash* pada *switchgear* tegangan menengah di PT. Linde Indonesia site Gresik.
2. Mengetahui lama durasi *arc flash* pada *switchgear* tegangan menengah di PT. Linde Indonesia site Gresik.
3. Alat pelindung diri apa yang tepat untuk alat perlindungan diri (PPE) terhadap *arc flash* yang terjadi.
4. Pembuatan label peringatan pada switchgear tegangan menengah yang berdasarkan durasi dan energi dari *arc flash*.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada Tugas Akhir ini meliputi:

1. Studi literatur

   Pengumpulan Data yang diperlukan untuk perhitungan dan analisis *arc flash.* Pengumpulan literatur-lieratur yang berhubungan dengan analisis dan mitigasi bahaya arc flash pada sistem kelistrikan industri..
2. Pengumpulan Data

   Pengambilan data yang didapatkan dari *single line diagram* berupa spesifikasi peralatan yang meliputi generator, transformator, motor, CB, dan peralatan lainnya dari sistem kelistrikan PT. Linde Indonesia
3. Simulasi

   Data yang diperoleh kemudian diolah dalam bentuk simulasi untuk mengetahui kategori *arc flash*, meresetting proteksi yang belum benar, serta mereduksi *energy arc flash* dengan menggunakan *software* ETAP 7.5.

4. Analisa Data
   Dari simulasi dan pemodelan didapatkan karakteristik dan kategori *arc flash* dari sistem kelistrikan dan kemudian dilakukan analisa terhadap hasil tersebut.
5. Kesimpulan
   Merupakan pembuatan kesimpulan dari permasalahan yang telah dianalisa. Selain itu juga diberikan saran atau rekomendasi terkait hal yang telah dianalisa.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan buku laporan tugas akhir ini berisi lima bab, yaitu pendahuluan, teori penunjang, perencanaan dan pembuatan alat, pengujian dan analisa data, dan terakhir penutup.

Bab I (Pendahuluan)

Bab ini berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

Bab II (Sistem Pengaman Tenaga Listrik dan Busur Api)

Bab ini berisi teori – teori yang mendasari dan mendukung tugas akhir ini.

Bab III (Sistem Kelistrikan PT Linde Indonesia site Gresik)

Bab ini mengenai konfigurasi dan operasi sistem tenaga listrik di PT Aneka Tambang Pomalaa.

Bab IV (Hasil Simulasi dan Analisa)

Bab ini berisi hasil simulasi, perhitungan – perhitungan, dan analisa dari hasil yang sudah didapatkan.

Bab V (Penutup)

Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan tugas akhir ini dan saran – saran untuk perbaikan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberi rekomendasi dan menjadi reverensi bagi PT. Linde Indonesia mengenai sistem kelistrikan, khususnya mengenai koordinasi proteksi dan perlindungan peralatan akibat adanya busur api. Tugas akhir ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

BAB 2
SISTEM PENGAMAN TENAGA LISTRIK DAN BUSUR API

2.1 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik dapat mengalami keadaan tidak normal yang disebut dengan gangguan. Gangguan ini dapat berasal dari dalam sistem sendiri maupun dari luar sistem. Beberapa gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik ialah, gangguan beban lebih, gangguan hubung singkat dan busur api.

Gangguan dapat diartikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen, atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fase atau hubung singkat fase ke tanah. Suatu gangguan hampir selalu berupa hubung langsung atau melalui impedansi. Istilah gangguan identik dengan hubung singkat [3].

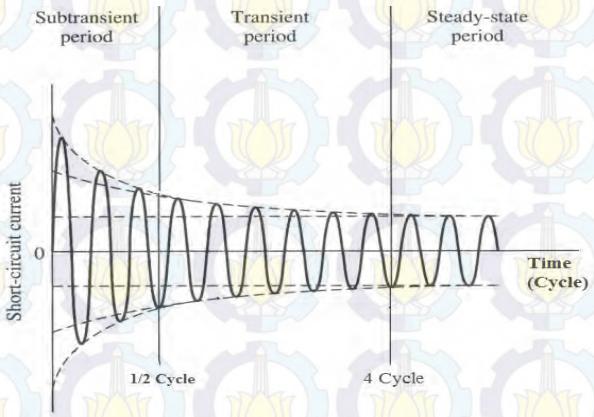
2.1.1 Gangguan Beban Lebih

Gangguan ini terjadi disebabkan arus yang mengalir melebihi arus nominal yang diiizinkan (I>In). Rangkaian dapat mengalami gangguan berbeban lebih karena hubungan rangkaian yang lebih besar atau penambahan peralatan. Pada saat gangguan ini terjadi arus yang mengalur melebihi dari kapasitas peralatan listrik. Bila gangguan ini dibiarkan terus menerus, maka dapat merusak peralatan listrik yang dialiri arus tersebut [3].

2.1.2 Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat atau biasa disebut *short circuit* adalah salah satu jenis ganggaun sistem tanaga listrik. Penyebab terjadinya hubung singkat diantaranya adalah kerusakan pada isolasi peralatan, panas yang lebih, kerusakan mekanis pada peralatan distribusi, dan kerusakan peralatan listrik karena *overload*. Gangguan hubung singkat menimbulkan aliran arus dengan nilai yang besar menuju ke titik gangguan. Aliran arus yang besar tersebut merupakan jumlah dari arus kontribusi yang berasal dari generator serta beban berupa motor. Hubung singkat juga dipengaruhi oleh nilai reaktansi peralatan maupun reaktansi pada rangkaian.

Hubung singkat akan dibagi ke tiga periode berdasarkan terjadinya yaitu, periode subtransient, transient, dan steady state. Periode subtransient (X"d) yaitu kondisi ½ *cycle* dan mempunyai level arus hubung singkat yang tinggi. Level arus hubung singkat tersebut kemudian turun pada periode transient (X'd) yang terjadi pada kondisi 1½ - 4 *cycle*. Setelah kondisi mencapai 30-*cycle* atau periode steady state, reaktansinya disebut dengan reaktansi sinkron (Xd) [3]. Berikut merupakan gambar dari ketiga periode tersebut.



Gambar 2.1 Gelombang Arus Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu hubung singkat simetri dan asimetri. Gangguan hubung singkat simetri merupakan gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah, sedangkan gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah merupakan gangguan hubung singkat asimetri [2]. Untuk menghitung besar arus hubung singkat pada sistem tegangan menengah dapat digunakan persamaan sebagai berikut [3].

a. Hubung singkat tiga fasa ke tanah

Merupakan hubung singkat yang melibatkan ketiga fasa. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$Isc_{3\Phi} = \frac{V_{L\_N}}{X_1} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$Isc_{3\Phi}$: arus hubung singkat tiga fasa

$V_{L\ N}$: tegangan *line to netral*
X_1 : reaktansi urutan positif

b. Hubung singkat antar fasa

Merupakan hubung singkat yang terjadi antar dua fasa tanpa terhubung ke tanah. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$Isc_{2\Phi} = \frac{V_{L\_L}}{X_1 + X_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} Isc_{3\Phi} \approx 0{,}86\ Isc_{3\Phi}. \quad (2.2)$$

Keterangan :

$Isc_{2\Phi}$: arus hubung singkat antar fasa
$V_{L\ L}$: tegangan *line to line*
X_1 : reaktansi urutan positif
X_2 : reaktansi urutan negative

c. Hubung singkat satu fasa ke tanah

Merupakan hubung singkat yang melibatkan impedansi urutan nol. Besar arus hubung singkat tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$Isc_{0\Phi} = \frac{3 V_{L\_N}}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (2.3)$$

Keterangan :

$Isc_{0\Phi}$: arus hubung singkat satu fasa ke tanah
$V_{L\ N}$: tegangan *line to netral*
X_1 : reaktansi urutan positif
X_2 : reaktansi urutan negative
X_0 : reaktansi urutan nol

d. Hubung singkat fasa ke netral

Merupakan hubung singkat yang terjadi antara salah satu fasa dengan netral. Berikut merupakan persamaan tersebut.

$$Isc_{1\Phi} = \frac{V_{L\_L}/\sqrt{3}}{Zsc + ZLN} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$Isc_{1\Phi}$: arus hubung singkat satu fasa ke netral
$V_{L\ L}$: tegangan *line to line*
Z_{LN} : impedansi netral

Gangguan hubung singkat menimbulkan nilai *arcing current* yang menjadi salah satu faktor penyebab timbulnya energi busur api. Data

yang dibutuhkan untuk melakukan analisa hubung singkat diantaranya adalah nilai impedansi generator, nilai impedansi kabel, nilai impedansi transformer dan nilai impedansi beban motor serta rating dari masing-masing peralatan sistem kelistrikan.

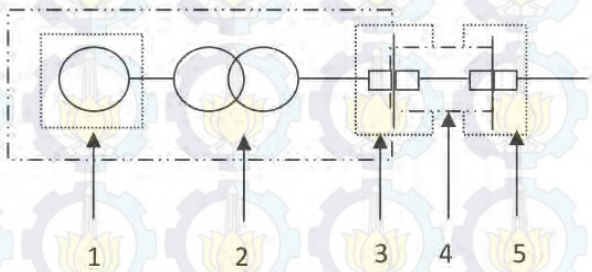
2.2 Rele Pengaman Sistem Tenaga Listrik

Rele merupakan bagian dari peralatan sistem tenaga listrik digunakan untuk memberikan sinyal kepada CB agar dapat memutus atau menghubungkan pada sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan ataupun tidak.

2.2.1 Prinsip Kerja Rele Pengaman

Rele pengaman mempunyai dua bagian yaitu elemen operasi dan kontak. Pada elemen operasi menerima masukan arus dari transformator arus (CT) atau transformator tegangan (PT) atau kombinasi keduanya. Selanjutnya elemen operasi tersebut melakukan pengukuran atau perbandingan operasi dasar input dan mengubahnya dalam bentuk gerakan kontak. Jika kontak dalam keadaan tertutup maka rele akan memberikan sinyal untuk membuka CB

2.2.2 Konsep Dasar Daerah Pengamanan Rele



Gambar 2.2 Pembagian Zona Pengaman

Keterangan :
1. zona pengaman generator
2. zona pengaman trafo
3. zona pengaman busbar

4. zona pengaman saluran
5. zona pengaman busbar

Pada konsep daerah pengaman, fungsi dari rele dibedakan menjadi rele pengaman utama dan rele pengaman cadangan.

2.3 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Rele arus lebih merupakan rele yang digunakan sebagai pengaman gangguan hubung singkat, tetapi dalam beberapa hal dapat berfungsi sebagai pengaman beban lebih memiliki nomor seri 50/51

2.3.1 Prinsip Kerja Rele Arus Lebih

Rele akan bekerja jika arus gangguan yang melewati rele lebih besar dari arus kerja rele. Sedangkan rele akan tidak bekerja jika arus gangguan yang melewati rele lebih kecil dari arus kerja rele. Besarnya arus gangguan dinyatakan terhadap gulungan sekunder CT (*current transformer*) dan arus kerja dinyatakan terhadap gulungan sekunder CT.

$I_f > I_p \longrightarrow$ rele akan bekerja

$I_f < I_p \longrightarrow$ rele tidak bekerja

Dimana :

I_f = Arus gangguan

I_p = Arus kerja rele

Dasar penyetelan rele arus lebih (*over current relay*) OCR adalah sebagai berikut :

Rele arus lebih (OCR) harus tidak bekerja saat beban maksimum, menurut British Standart 142 (BS 142) batas penyetelan adalah 1,05-1,3 I_{set}.

I_{set} adalah ≥ 1,05 In

$$I_{set} = \geq 1{,}05 \times I_{nominal} \quad (2.5)$$

$$I_s = \frac{Iset}{CT\ ratio} \quad (2.6)$$

$$\text{Tap} = I_s / I_n \quad (2.7)$$

Seting arus aktual I_{set} = tap x I_n x CT (2.8)

Batasan maksimum juga harus diperhatikan dalam pengaturan rele arus lebih tersebut. Persamaan untuk pengaturan batasan maksimum penyetelan adalah sebagai berikut [5].

$$I_{set} \leq 0{,}8\, I_{sc\,min} \qquad (2.9)$$

$$Tap = \frac{Iset}{CT\ primary} \qquad (2.10)$$

Keterangan :

I_s = arus *setting* (ampere)

Iset = arus pick up (ampere)

Waktu operasi rele ditentukan dalam pengaturan time dial. Time dial menunjukkan kecuraman dari kurva rele. Persamaan yang digunakan untuk menentukan time dial dari masing kurva karakteristik adalah sebagai berikut [7].

$$td = \frac{k \times t}{\left[\left(\frac{I}{Iset}\right)^{\alpha} - 1\right]} \times \frac{1}{\beta} \qquad (2.11)$$

Keterangan :

t = waktu operasi (detik)

Td = *time dial*

I = nilai arus (Ampere)

Iset = arus *pickup* (Ampere)

K = koefisien invers 1

α = koefisien invers 2

β = koefisien invers 3

Tabel 2.1 Koefisien Invers *Time Dial* [7].

Tipe Kurva	Koefisien		
	k	α	B
Standard / normal Inverse	0,14	0,02	2,97
Very Inverse	13,50	1,00	1,5
Extremely Inverse	80,00	2,00	13,3

Selain sebagai pengaman utama, rele arus lebih juga berfungsi sebagai pengaman *backup*. Pengaman utama dan pengaman *backup* tidak boleh bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu dalam pengaturan rele arus lebih harus memperhatikan *time delay* antara rele utama dengan rele *backup*. Berdasarkan standard IEEE std 242-2001, spesifikasi untuk rele berbasis analog adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2 Spesifikasi Rele Berbasis Analog [7]

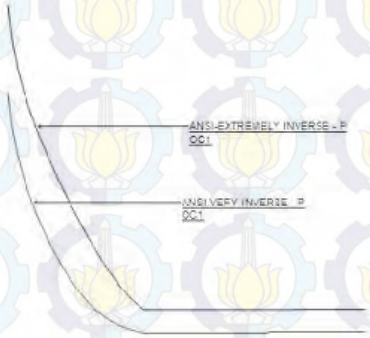
Parameter	Nominal *(second)*
Time Delay	0,2 – 0,35 s
Waktu buka CB	0,04 – 0,1s (2-5 *cycle*)
Overtravel Rele	0,1 s
Faktor keamanan	0,12-0,22 s

Sedangkan untuk rele berbasis *microprosessor overtravel time* dari Rele diabaikan. Sehingga waktu yang diperlukan adalah 0,2-0,4s [7].

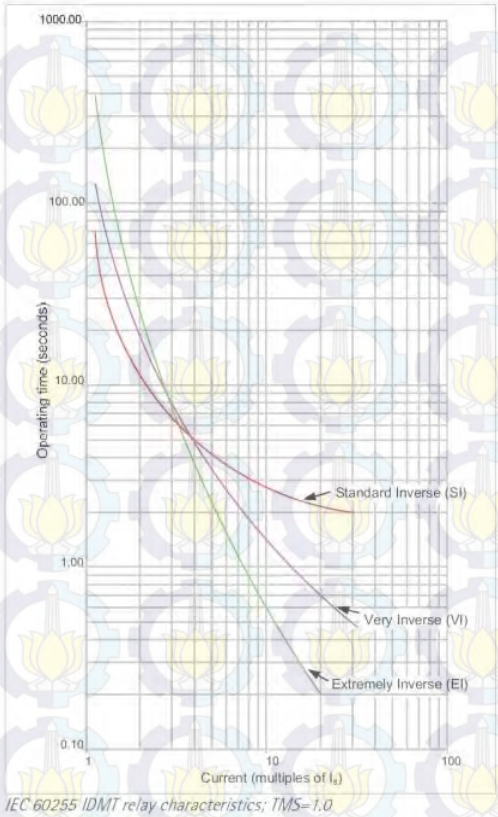
2.3.2 Macam-macam Rele Arus Lebih

2.3.2.1 Rele Arus Lebih Waktu Invers

Rele OCR waktu invers memiliki waktu operasi yang berbandign terbalik dengan besarnya arus gangguan. Jika semakin besar arus gangguan yang terjadi maka rele akan beroperasi dalam waktu yang semakin cepat. *Time-current characteristic* (TCC) adalah kurva dengan skala dalam *time dial*. Semakin besar *time dial*, maka semakin lama waktu operasi dari rele tersebut. Karakteristik dari rele OCV waktu invers ini dijelaskan dalan standar IEC 60255-3 dan IEEE std 242-2001. Standar tersebut mendefinisikan dalam beberapa jenis waktu *invers* yaitu : *standard inverse, very inverse,* dan *extremely inverse* seperti gambar 2.3 dan 2.4. Kurva invers ini sering dijumpai dengan *inverse definite minimum time* (IDMT). Karena seiring dengan arus yang bertambah besar, waktu operasi turun semakin cepat seolah mendekati waktu *definite* minimumnya.



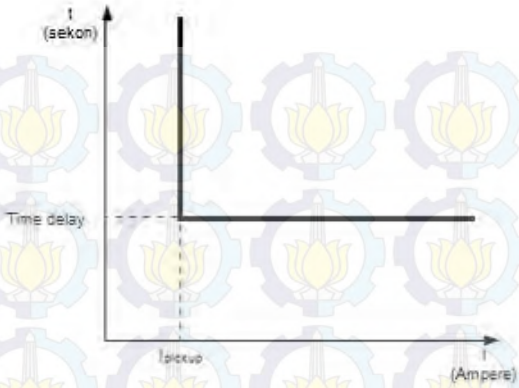
Gambar 2.3 Karakteristik Kurva Invers pada Standar ANSI



Gambar 2.4 Karakteristik Kurva Invers pada Standar IEC

2.3.2.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

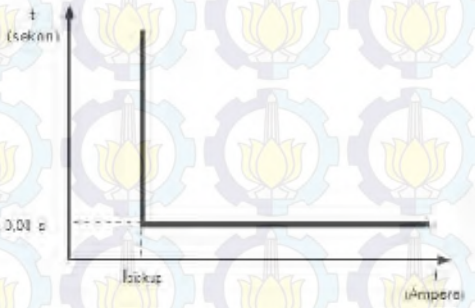
Rele OCR jenis waktu ini dapat diatur waktu operasi yang beragam sesuai *level* arus yang berbeda. Dengan menggunakan rele arus lebih jenis ini gangguan dapat diputus dengan cepat sesuai dengan *time delay* yang di*setting*. Gambar 2.5 menunjukkan karakteristik dari rele arus lebih waktu tertentu.



Gambar 2.5 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

2.3.2.3 Rele Arus Lebih Waktu Instan

Prinsip kerja dari rele jenis ini hampir sama dengan rele jenis waktu tertentu tetapi untuk waktu yang digunakan sangat cepat sebesar 0.1 detik, pada umumnya kurang dari 0.08 detik, terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu *Instant*

Rele ini bekerja berdasakan besar dari arus gangguan hubung singkat yang dipilih dan membukanya CB dalam waktu cepat sekali (80 ms). Gambar 2.7 menunjukkan penggunaan IDMT yang dikombinasikan dengan rele arus lebih waktu tertentu.

Gambar 2.7 Kombinasi IDMT dengan Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

2.3.3 *Setting* Rele IDMT

Penyetelan rele arus lebih harus tidak bekerja pada saat beban maksimum. Oleh karena itu *setting* arusnya harus lebih besar dari arus beban maksimum. Menurut BS 142 batas *setting* adalah 1.05-1.3 I_{fl}. Pada rele arus lebih, besarnya ditentukan dengan pemilihan nilai tap menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Tap} = I_{set} / \text{CT primary}$$

Selain menentukan nilai tap *setting* juga menentukan *setting* time dial untuk masing-masing kurva invers dapat menggunakan persamaan berikut :

$$t = T \times \left(\frac{K}{(I / I_s)^{\alpha} - 1} + L \right) \qquad (2.12)$$

t = waktu operasi (detik)
T = timedial
I = nilai arus (Ampere)
Is = arus pickup (Ampere)

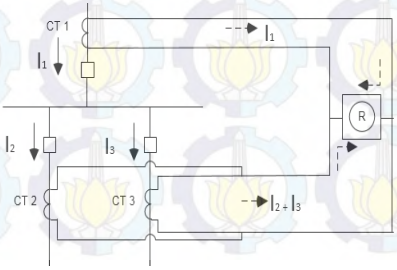
K = koefisien invers1 (lihat Tabel 2.4)
α = koefisien invers 2 (lihat Tabel 2.4)

Tabel 2.3 Koefesien Invers Time Dial

Type of curve	Standard	K factor	α factor	L factor
Short time inverse	AREVA	0,05	0,04	0
Standard inverse	IEC	0,14	0,02	0
Very inverse	IEC	13,5	1	0
Extremely inverse	IEC	80	2	0
Long time inverse	AREVA	120	1	0
Short time inverse	C02	0,02394	0,02	0,01694
Moderately Inverse	ANSI/IEEE	0,0515	0,02	0,114
Long time inverse	C08	5,95	2	0,18
Very inverse	ANSI/IEEE	19,61	2	0,491
Extremely inverse	ANSI/IEEE	28,2	2	0,1217
Rectifier protection	RECT	45900	5,6	0

2.4 Rele Differensial

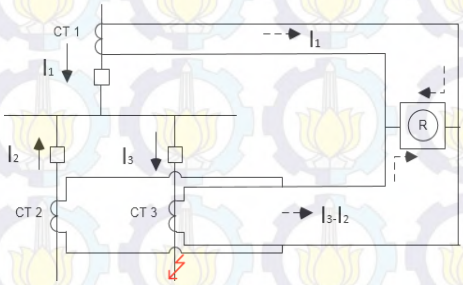
Prinsip kerja dari rele differensial ini adalah berdasar kepada hukum kirchoff, dimana arus yang masuk akan bernilai sama dengan arus yang keluar. Rele ini akan bekerja sesuai dengan zona yang di proteksi saja dan rele ini tidak bekerja jika ada gangguan beban lebih. Zona yang di proteksi ini di batasi oleh CT yang terhubung dari incoming dan outgoing dari suatu zona yang di proteksi. Pada kondisi normal, arah aliran arus dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.8 Rele Differensial Keadaan Normal

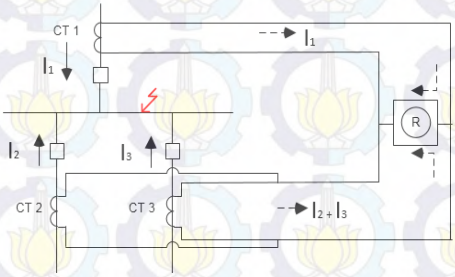
Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa dalam keadaan normal (tanpa gangguan), aliran arus yang masuk dan keluar dari daerah yang di proteksi bernilai sama. Sehingga rele tidak bekerja

Sedangkan bila terjadi gangguan eksternal atau di luar daerah yang di proteksi pada gambar 2.6, maka arah aliran arus menuju kepada titik gangguan, sehingga besar arus I_3 sama dengan penjumlahan arus dari I_1 dan I_2, sehingga dapat dipastikan rele tidak bekerja.



Gambar 2.9 Rele Differensial Keadaan Gangguan Eksternal

Sedangkan bila terjadi gangguan internal atau berada pada daerah yang di proteksi pada gambar 2.7, maka arah aliran arus menuju kepada titik gangguan, sehingga terjadi ketidak seimbangan jumlah arus yang masuk dan yang keluar, sehingga rele bekerja untuk memberi sinyal kepada CB yang terpasang pada setiap *feeder incoming* dan *feeder outgoing* untuk *trip*.



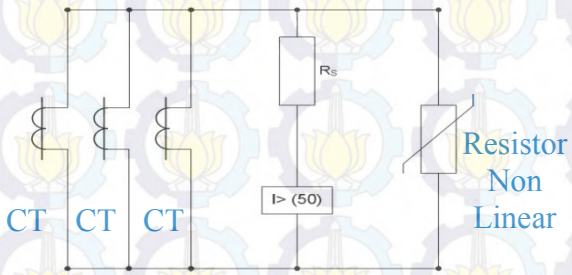
Gambar 2.10 Rele Differensial Keadaan Gangguan Internal

2.4.1 Rele Differensial *High Impedance*

secara umum rele ini digunakan untuk proteksi pada bus, rele ini memiliki impedansi yang tinggi dan bersifat resistif pada rangkaian. Semua CT yang terpasang pada feeder incoming dan outgoing yang tersambung pada bus harus memiliki ratsio yang sama. Rele differensial memiliki fitur sebagai berikut [7] :

- Bekerja pada kecepatan tinggi yaitu 1-3 *cycle*
- Memiliki sensitivitas tinggi dan dapat bekerja pada gangguan arus fasa atau gangguan arus ke tanah dengan nilai yang kecil.
- Tidak bekerja pada saat terjadi gangguan diluar zona pengaman
- Harus bekerja untuk semua gangguan yang terjadi pada internal zona pengaman.

Skema rele differensial *high impedance* dapat dilihat pada gambar 2.8, adanya resistansi yang dipasang secara seri dengan rele tersebut berfungsi untuk mencegah rele salah beroperasi akibat adanya salah satu CT yang tidak membaca nilai arus ketika terjadi gangguan eksternal. Oleh karenannya, rele ini lebih selektif terhadap pengamanan gangguan yang terjadi di internal pada daerah yang di proteksi.



Gambar 2.11 Skema Rele Differensial *High Impedance*

Pada skema Skema Rele Differensial *High Impedance* dibutuhkan adanya stabilizing resistor (RS) agar dapat terbangkit tegangan pada resistor tersebut ketika dialiri arus. Saat terjadi gangguan, maka akan timbul arus yang mengalir melewati rele dan resistor sehingga menyebabkan terbangkitnya tegangan. Apabila tegangan

tersebut melebihi nilai dari yang telah ditentukan, maka rele akan segera bekerja mengamankan daerah yang diamankan. Maka dari itu agar rele tidak bekerja saat terjadi gangguan di luar, maka di tentukan setting rele tersebut harus lebih tinggi dari tegangan yang terbangkit ketika ada gangguan eksternal.

Resistor *non linear* dipasang secara pararel dengan rele differensial. Ini bertujuan untuk membatasi nilai tegangan yang muncul pada rele. Sehingga rele tetap aman ketika terjadi gangguan internal.

2.4.2 *Setting* Rele Differensial *High Impedance*

Untuk mendapatkan kestabilan saat terjadi gangguan eksternal, maka harus di tentukan besarnya nilai tegangan stabilitas / *stability voltage*. Tegangan stabilitas merupakan tegangan yang terbangkit pada rele saat terjadi gangguan eksternal. Untuk itu, setting rele yang digunakan harus lebih tinggi dari nilai tersebut. Tegangan stabilitas dapat di tentukan dengan persamaan berdasarkan referensi berikut [7] :

$$Vs > 0{,}5\ I_f(R_{CT} + 2R_L) \qquad (2.6)$$

dimana :

R_{CT} = Resistansi sekunder CT

R_L = Resistansi kabel dari CT sampai Rele

I_f = Arus gangguan maksimum sisi sekunder

Pada *setting* nilai arus yang membuat rele bekerja di *setting* dibawah 30 % arus gangguan minimum dan diatas arus beban penuh dari satu *incomer*. Persamaan untuk menghitung besarnya *setting* arus yang membuat rele bekerja adalah sebagai berikut berdasarkan referensi [7] ;

$$I_{op} = CT_{ratio} \times (I_r + nIe) \qquad (2.7)$$

Dimana :

I_r = Setting arus

n = Jumlah CT yang terhubung dengan rele

Ie= Arus magnetisasi CT

Resistor dalam skema differensial ini berfungsi sebagai penghubung antara besaran tegangan stabilitas dengan besaran *setting* arus berdasarkan hokum ohm. Besarnya resistor dapat ditentukan dengan persamaan berdasarkan referensi [7]:

$$R_{ST} = \frac{V_{pkp}}{I_f} \qquad (2.8)$$

Dimana :

Vs = Tegangan Stabilitas
I_r = *Setting* arus

2.5 Busur Api (*Arc Flash*)

Berdasarkan *National Fire Protection Associaton (NFPA)* 70E-2004, *arc flash* adalah kondisi yang berbahaya akibat adanya pelepasan energi yang disebabkan oleh bunga api listrik [11]. Penyebab adanya bunga api listrik tersebut karena adanya arus gangguan atau *arcing fault* pada sebuah sistem kelistrikan. Arus gangguan dapat disebabkan oleh beberapa masalah antara lain kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, debu korosi serta kesalahan pekerja yang bekerja pada peralatan yang bertegangan. Disamping *arcing fault*, energi yang dihasilkan oleh *arc flash* juga bergantung pada beberapa faktor diantaranta tegangan, jarak pekerja dari titik *arcing*, dan durasi waktu yang dibutuhkan oleh perangkat proteksi untuk memitigasi adanya gangguan [14].

Pada saat insiden *arc flash* terjadi maka akan muncul pembakaran dari busur api, temperatur yang dihasilkan mencapai >35000° Farenheit, tekanan akibat adanya ledakan, suara ledakan yang berbahaya, dan juga gas beracun. Hal ini tentu sangat berbahaya karena dapat menyababkan kerusakan pada peralatan, luka bakar dan hingga kematian pada orang yang berada dekat dengan insiden. Karena hal tersebut energi busur api harus dimitigasi sesuai parameter kategori energi berdasarkan NFPA 70E. Dengan tingkat energi busur api yang sesuai NFPA 70E maka dapat ditentukan *personal protective equipment* (PPE) bagi pekerja [14].

2.5.1 *Arcing Current* [1]

Sesuai dengan IEEE Std 1584-2002, perhitungan *arcing current* merupakan langkah pertama dalam perhitungan level energi *arc flash*. Nilai *arcing current* diperoleh dari arus hubung singkat tiga fasa. Berikut merupakan persamaan untuk melakukan perhitungan *arcing current* pada sistem tegangan dibawah 1kV.

$$\lg I_a = K + 0{,}662 \lg I_{bf} + 0{,}0966\, V + 0{,}000526\, G + 0{,}5588\, V (\lg I_{bf}) \quad 0{,}00304\, G (\lg I_{bf}) \qquad (2.13)$$

Keterangan :

lg = $\log_{10}$
I_a = arus arcing (kA)
V = tegangan sistem (kV)

G = jarak antar konduktor (mm)

K = -0,153 untuk konfigurasi terbuka dan -0,097 untuk konfigurasi box

I_{bf} =*bolted fault current* pada gangguan tiga fase (symmetrical RMS) (kA)

Sedangkan pada sistem tegangan lebih dari 1kV menggunakan persamaan berikut [1].

$$\lg I_a = 0{,}00402 + 0{,}983 \lg I_{bf} \quad (2.14)$$

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (2.15)$$

2.5.2 *Incident Energy* [1]

Perhitungan yang sangat penting pada perhitungan energi busur api yaitu perhitungan energi insiden yang merupakan transfer energi dari busur api terhadap sesuatu yang dekat dengan terjadinya *arc flash*.

Sesuai dengan IEEE Std 1584-2002, perhitungan *incident energy arc flash* menggunakan persamaan sebagai berikut. Persamaan dibawah berdasarkan data *normalized* untuk waktu *arcing* yaitu 0.2 detik dan jarak dari titik ke pekerja yaitu 610 mm. Secara keseluruhan persamaan adalah sebagai berikut :

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1{,}081 \lg I_a + 0{,}0011\, G \quad (2.16)$$

$$E_n = 10^{\lg En} \quad (2.17)$$

Kemudian dirubah dari kondisi *normalized*

$$E = 4{,}184\, C_f E_n \left(\frac{t}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (2.18)$$

Keterangan:

E_n = energi insiden normal untuk waktu dan jarak (J/cm^2)

K_1 = Konstanta (-0,792 untuk konfigurasi terbuka dan -0,555 untuk konfigurasi dalam ruang)

K_2 = Konstanta (0 untuk *ungrounded* dan HRG; -0,113 untuk *grounded system*)

G = jarak antar konduktor (mm) (Lihat Tabel 4)

E = energi insiden (J/cm^2)

C_f = faktor perhitungan (1,0 untuk tegangan diatas 1 kV dan 1,5 untuk tegangan dibawah atau sama dengan 1 kV)

E_n = Energi insiden normal

t = waktu terjadinya busur api (detik)

D = jarak dari titik busur api ke manusia (mm)

x = eksponen jarak (Lihat Tabel 2.4)

Untuk level tegangan di atas 15 kV, jarak antar konduktor di luar batasan dari model, sehingga menggunakan Metode Lee untuk menentukan energi insidennya.

$$E = 2{,}142 \times 10^6 \, V \, I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \tag{2.19}$$

Keterangan:
E = energi insiden (J/cm^2)
V = tegangan sistem (kV)
t = waktu busur api (detik)
D = jarak dari titik busur api ke manusia (mm)
I_{bf} = *bolted fault current* (kA)

Tabel 2.4 Faktor untuk peralatan dan tingkat tegangan [5]

Tegangan Sistem (kV)	Jenis Peralatan	Jarak antar Konduktor (mm)	Faktor Jarak x
0.208 – 1	Udara terbuka	10 – 40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	Mcc dan Panel	25	1.641
	Kabel	13	2.000
>1 – 5	Udara Terbuka	102	2.000
	Switchgear	13 – 102	0.973
	Kabel	13	2.000
>5 – 15	Udara Terbuka	13 – 153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Kabel	13	2.000

2.5.3 *Flash Protection Boundary*

Flash Protection Boundary di rumuskan sebagai berikut:

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \tag{2.20}$$

Keterangan:
D_B = batas jarak dari titik busur api (mm)
C_f = faktor perhitungan (1.0 untuk tegangan di atas 1 kV, 1.5 untuk tegangan di bawah atau sama dengan 1 kV)
E_n = energi insiden normal
E_B = energi insiden dalam J/cm^2 pada batas jarak

t = waktu (detik)
x = eksponen jarak (Lihat Tabel 2.4)
I_{bf} = *bolted fault current* (kA)

Tabel 2.5 *Typical Bus Gaps* [5].

Classes of equipment	*Typical bus gaps (mm)*
15kV Switchgear	152
5kV Switchgear	104
Low voltage switchgear	32
Low voltages MCCs and panelboards	25
Cable	13
Other	*Not required*

Tabel 2.6 *Typical Working Distances*[5]

Classes of equipment	*Typical working distance (mm)*
15 kV switchgear	914,4
5 kV switchgear	914,4
Low-voltage switchgear	609,6
Low-voltage MCCs and panelboards	457,2
Cable	457,2
Other	*To be determined in field*

2.5.4 *Lee Method* [1]

Persamaan metode Lee digunakan untuk mencari nilai *incident energy* saat level tegangan pada bus lebih dari 15 kV. Berikut adalah persamaan tersebut berdasarkan IEEE Std 1584-2002.

$$E = 2{,}42 \times 10^6 V\, Ibf \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (2.21)$$

Keterangan :

E = incident energy (J/cm2)
V = level tegangan (kV)
t = arcing time (seconds)
D = Jarak antara titik arcing dengan pekerja (mm)
*I*bf = bolted fault current

Untuk tegangan lebih dari 15 kV, arc fault current dipertimbangkan sama dengan bolted fault current.

2.5.5 Pengelompokan Kategori Energi Busur Api

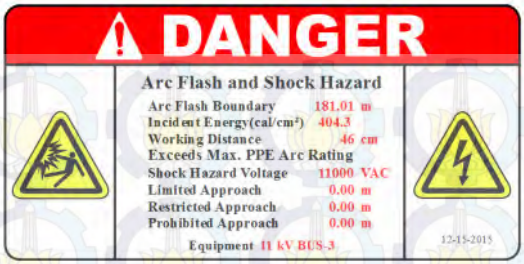
Pengelompokan kategori energi busur api dilakukan setelah mendapatkan nilai *incident energy* pada setiap bus. Pengelompokan tersebut bertujuan untuk menentukan perlengkapan keselamatan diri yang harus dipakai oleh pekerja saat berada di area tersebut. Berikut merupakan *personal protective equipment* (PPE) sesuai standar NFPA 70E [11].

Tabel 2.7 *Protective Clothing Characteristics*

Hazard Category	*PPE Description*	*Arc Rating cal/cm2*	*PPE*
0	*- Cotton Undergarment* *- Long Sleeved Shirt* *- Long Pants* *- Safety Glasses* *- Hearing Protection* *- Leather Gloves*	N/A (1,2)	
1	*- Cotton Undergarment* *- Arc Rated Long Sleeved Shirt (FR Coveralls)* *- Arc Rated Long Pants (FR Coveralls)* *- Hard Hat and Safety Glasses* *- Hearing Protection* *- Leather Gloves and Shoes*	4	
2	*- Cotton Undergarment* *- Short Sleeved "T" Shirt* *- Arc Rated Sleeved Shirt and Long Pants* *- Hard Hat and Safety Glasses* *- Hearing Protection* *- Leather Gloves and Shoes*	8	

3	*- Cotton Underwear* *- Short Sleeved "T" Shirt* *- Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* *- Arc Rated Coveralls* *- Arc Rated Suited Jacket (25 Cal)* *- Arc Rated Suited Pants (25 Cal)* *- Arc Rated Suited Hood (25 Cal)* *- Hard Hat and Safety Glasses* *- Hearing Protection* *- Arc Rated Leather Gloves* *- Leather Shoes*	25	
4	*- Cotton Underwear* *- Short Sleeved "T" Shirt* *- Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* *- Arc Rated Coveralls* *- Arc Rated Suited Jacket (40 Cal)* *- Arc Rated Suited Pants (40 Cal)* *- Arc Rated Suited Hood (40 Cal)* *- Hard Hat and Safety Glasses* *- Hearing Protection* *- Arc Rated Leather Gloves* *- Leather Shoes*	40	

Selain *personel protective equipment* (PPE), pada bus yang beresiko muncul energi busur api juga diberi label arc flash. Berikut merupakan contoh dari label tersebut sesuai standar NFPA 70E [11].



Gambar 2.12 *Arc Flash Label*

BAB 3
SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE INDONESIA GRESIK

3.1. Sistem Kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik

PT. Linde Indonesia Gresik merupakan naggota dari Grup Linde, adalah pemasok gas industri terkemuka di Indonesia sejak tahun 1971. PT. Linde Indonesia Gresik merupakn industri yang memproduksi dan mendistribusikan gas-gas khusus medis dan menyediakan berbagai layanan instalasi peralatan gas, pipa, pada pabrik dan jasa rekayasa terkait. Pabrik ini menggunakan pembangkit sendiri dan suplai dari PLN untuk memenuhi kebutuhan energi listrik mereka. Sistem distribusi yang digunakan adalah sistem distribusi radial yang menyuplai beban motor dan static. Tegangan yang digunakan ialah 150kV untuk tegangan tiggi, 3,3 – 30 kV untuk tegangan menengah, dan 0,4 kV untuk tegangan rendah. Single Line Diagram di PT. Linde Indonesia Gresik dapat dilihat dalam Gambar 3.1.

3.2. Sistem Pembangkitan PT. Linde Indonesia Gresik

Perusahaan ini memiliki 11 generator dengan kapasitas bervariasi dan sumber dari grid PLN. Generator yang digunakan yaitu dua *steam turbine* generator, empat *gas engine* generator, lima *combustion turbine* generator.

Berikut data generator yang digunakan di PT. Linde Indonesia Gresik:

Tabel 3.1 Data Pembangkit di PT. Linde Indonesia Gresik

No.	ID	kV	MVA	MW	pf	%eff	rpm
1.	1TGA-STG-1	11	10,588	9	0,85	95	1500
2.	1TGA-STG-2	11	10,588	9	0,85	95	1500
3.	1TGG-GEG-1	11	3,75	3	0,80	96,7	1500
4.	1TGG-GEG-2	11	3,75	3	0,80	96,7	1500
5.	1TGG-GEG-3	11	3,75	3	0,80	96,7	1500
6.	1TGG-GEG-4	11	3,75	3	0,80	96,7	1500
7.	1TGK-CTG-1	11	12,5	10	0,80	95	1500
8.	1TGK-CTG-2	11	12,5	10	0,80	95	1500

No.	ID	kV	MVA	MW	pf	%eff	rpm
9.	1TGK-CTG-3	11	12,5	10	0,80	95	1500
10.	BSD	11	1,25	1	0,80	95	1500
11.	CT-4	11	12,5	10	0,80	95	1500

3.3. Sistem Distribusi PT. Linde Indonesia Gresik

Sistem distribusi yang digunakan pada sistem kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik adalah sistem distribusi radial dengan empat *feeder* utama yang dihubungkan oleh *switch* dan *feeder* dari *grid* PLN. Daya dari semua generator ke bus 11kV kemudian ada yang dihubungkan ke lavel tegangan 20kV, 11kV, 6.3kV, 6kV, 3.3kV dan 0.4kV.

Level tegangan yang digunakan untuk sistem kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik ialah tegangan tinggi, tegangan menengah, dan tegangan rendah yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut:

Tabel 3.2 Data Bus di PT. Linde Indonesia Gresik

No.	ID	Tegangan (kV)
1	1APC-SUS-1	0,400
2	1APD-MCC-1	3,300
3	1APD-MCC-1new	3,300
4	1APD-MCC-2	3,300
5	11 kV BUS-1	11,000
6	11 kV BUS-2	11,000
7	11 kV BUS-3	11,000
8	11 kV BUS-4	11,000
9	030-SG-001	11,000
10	100-sg-101	6,000
11	100-sg-201	6,000
12	200-SG-001	6,000
13	300-SG-001	6,000
14	400-sg-001	6,000
15	420-SG-001	11,000
16	BOC-PLN	20,000
17	BOC-PLN-2	20,000

No.	ID	Tegangan (kV)
18	Bus1	150,000
19	Bus2	20,000
20	Bus3	11,000
21	Bus4	6,300
22	Bus5	20,000
23	Bus7	20,000
24	Bus9	11,000
25	Bus15	11,000
26	Bus17	3,300
27	Bus18	0,400
28	Bus19	0,400
29	Bus20	3,300
30	Bus21	0,400
31	Bus22	3,300
32	Bus26	11,000
33	Bus27	11,000
34	Bus29	11,000
35	Bus30	11,000
36	BUS-0076	3,300
37	BUS-0078	3,300
38	BUS-0080	3,300
39	BUS-0081	3,300
40	BUS-0082	3,300
41	BUS-0083	3,300
42	BUS-0084	3,300
43	BUS-0152	11,000
44	BUS-0212	11,000
45	BUS-0213	11,000
46	BUS-0214	11,000
47	BUS-0215	11,000
48	BUS-0216	11,000
49	BUS-0221	11,000
50	BUS-0254	11,000
51	MCC-1	0,400
52	MCC-2	0,400
53	MCC-3	0,400

Transformator yang digunakan dalam sistem distribusi ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.3 Data transformator di PT. Linde Indonesia Gresik

No.	ID	Daya (MVA)	Tegangan (kV)	
			Primer	Sekunder
1	1APC-XF-1	2,000	11,000	0,400
2	1APC-XF-2	2,000	11,000	0,400
3	1APD-XF-1	2,000	11,000	3,300
4	1APD-XF-2	2,000	11,000	3,300
5	1APF-XF-1	20,000	11,000	20,000
6	100-TF-101	15,000	11,000	6,000
7	100-TF-201	15,000	11,000	6,000
8	200-TF-001	5,000	11,000	6,000
9	300-TF-001	15,000	11,000	6,000
10	400-TF-001	15,000	11,000	6,000
11	420-TF-001	6,455	11,000	0,400
12	420-TF-002	6,455	11,000	0,400
13	420-TF-0033	2,000	11,000	0,400
14	TR-CP11B	2,000	20,000	6,300
15	TR-PLN	60,000	150,000	20,000

3.4. Beban di PT. Linde Indonesia Gresik

Ada dua jenis beban yang digunakan di, yaitu beban motor dan beban static. Beberapa beban motor dan *static* di gabungkan menjadi beban *lump*. Data mengenai beban motor dan *lump* dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5.

.

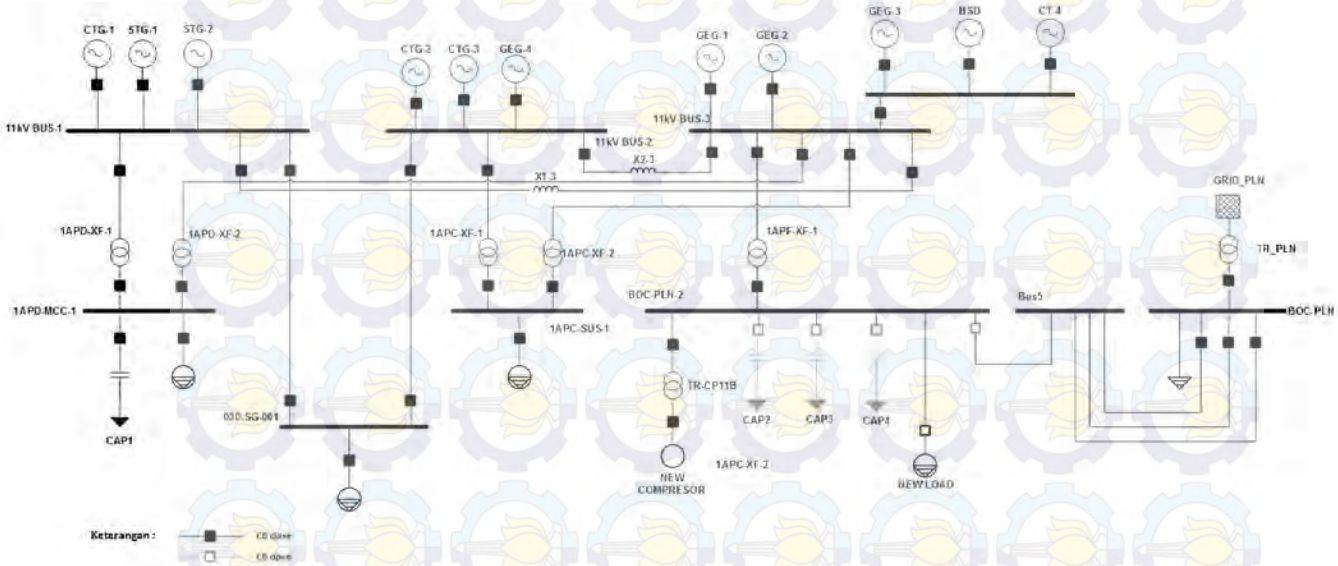
Tabel 3.4 Data beban motor di PT. Linde Indonesia Gresik

No.	ID	Tegangan (kV)	Daya (kW)
1	1FWA-P-3A	3,000	223,800
2	1FWA-P-3B	3,000	223,800
3	1FWA-P-3C	3,000	223,800
4	1HRC-FAN-1A	3,300	150,000

No.	ID	Tegangan (kV)	Daya (kW)
5	1HRC-FAN-1B	3,300	150,000
6	1HRC-FAN-1C	3,300	150,000
7	1HRC-P-1A	3,000	447,600
8	1HRC-P-1B	3,000	447,600
9	1HRC-P-1C	3,000	447,600
10	ACID-MTR	6,000	4500,000
11	Mtr2	3,000	350,000
12	Mtr4	3,000	350,000
13	Mtr5	3,000	350,000
14	Mtr6	3,000	240,000
15	New Compresor	6,600	1000,000

Tabel 3.5 Data beban *lump* di PT. Linde Indonesia Gresik

No.	ID	Tegangan (kV)	Daya (MW)	Static Load (%)	Motor Load (%)
1	LD_MCC-1	0,400	280,000	0	100
2	LD_MCC-2	0,400	339,000	0	100
3	LD_MCC-3	0,400	380,000	0	100
4	LL-ACID	6,000	0,889	20	80
5	LL-RAW	6,000	1,862	0	100
6	LL-REFINERY	6,000	2,733	20	80
7	LL-SMELTER1	6,000	2,801	0	100
8	LL-SMELTER2	6,000	280,000	0	100
9	Lump3	6,000	1,700	0	100
10	Lump5	6,000	1,800	0	100
11	Lump6	6,000	1,800	0	100
12	Lump7	6,000	1,800	0	100
13	Lump_Add	11,000	1,420	10	90
14	NEW_LOAD	20,000	8,500	10	90
15	Load1	20,000	25,299	100	0



Gambar 3.1 *Single Line Diagram* PT. Linde Indonesia Gresik

BAB 4
HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Permodelan Sistem Kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik

Tugas akhir ini membahas analisa *arc flash* yang terjadi pada sistem kelistrikan dan bagaimana mengurangi dan memperkecil dampak yang ditimbulkan terjadinya *arc flash* pada sistem kelistrikan PT. Linde Indonesia Gresik. *Single line diagram* dari industri tersebut dimodelkan pada *software* ETAP 7.5, maka dari itu dibutuhkan data peralatan yang terdiri dari data generator, trafo, motor, beban statik, kabel, bus, dan sistem pentanahan. Kemudian akan dilakukan analisa *arc flash* pada bus atau *switchgear* tegangan menengah yang terdiri dari bus 11kV BUS-1, 11kV BUS-2, 11-kV BUS-3, 11-kV BUS-4, Bus9, Bus15, BUS-0152, BUS-0212, BUS-0213, BUS-0214, BUS-0215, BUS-0216, BUS-0221, BUS-0254, Bus4, 1APD-MCC-1, 1APD-MCC-1new, 1APD-MCC-2, Bus17, Bus20, Bus22, BUS-0076, BUS-0078, BUS-0080, BUS-0081, BUS-0082, BUS-0083 dan BUS-0084. Karena pada sistem kelistrikan dari PT. Linde Indonesia Gresik ini bergabung dengan sistem dari *smelting* maka bus yang ada di *smelting* tidak dilakukan analisis *arc flash*.

4.2 Analisa dan Perhitungan Energi Busur Api pada Kondisi Eksisting

Berdasarakan *setting* koordinasi kondisi eksisting, selanjutnya dilakukan analisa terhadap energi busur api. Analisa tersebut menggunakan metode standart IEEE 1584. Tujuan dari analisa tersebut adalah untuk mengetahui nilai dari *arcing current, incident energy* dan kategorinya, serta cara untuk mitigasi dari bahaya *arc flash*.

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai nilai dari energi insiden busur api berdasarkan data *existing* dari perusahaan. Nilai yang akan dicari ialah *Arc Flash Current* dan Energi Insiden Busur Api. Data yang diperlukan dalam perhitungan ini dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 4.1 Data bus untuk perhitungan energi busur api kondisi eksisting

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	Work Distance (mm)	Gap (mm)	X factor
1APD-MCC-1	3,3	16,80	0,40	914,4	102	0,973
1APD-MCC-1new	3,3	16,80	0,40	914,4	102	0,973
1APD-MCC-2	3,3	16,80	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0076	3,3	15,76	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0078	3,3	15,76	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0080	3,3	15,74	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0081	3,3	15,74	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0082	3,3	15,79	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0083	3,3	15,78	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0084	3,3	15,78	0,40	914,4	102	0,973
Bus17	3,3	15,77	0,40	914,4	102	0,973
Bus20	3,3	15,77	0,40	914,4	102	0,973
Bus22	3,3	15,76	0,40	914,4	102	0,973
Bus4	6,3	2,89	0,20	914,4	153	0,973
11 kV BUS-1	11	33,54	0,91	914,4	153	0,973
11 kV BUS-2	11	32,31	2,84	914,4	153	0,973
11 kV BUS-3	11	38,22	4,51	914,4	153	0,973
11 kV BUS-4	11	38,22	9,41	914,4	153	0,973
BUS-0152	11	27,30	0,05	914,4	153	0,973
BUS-0212	11	33,29	0,40	914,4	153	0,973
BUS-0213	11	36,67	0,40	914,4	153	0,973
BUS-0214	11	30,17	2,45	914,4	153	0,973
BUS-0215	11	37,59	4,28	914,4	153	0,973
BUS-0216	11	37,79	0,40	914,4	153	0,973
BUS-0221	11	27,08	0,05	914,4	153	0,973
BUS-0254	11	27,42	1,17	914,4	153	0,973
Bus15	11	20,36	0,05	914,4	153	0,973
Bus9	11	27,06	0,05	914,4	153	0,973

Perhitungan untuk masing – masing bus dapat dilihat sebagai berikut:

a. Perhitungan energi busur api di bus dengan level tegangan 1 – 15 kV

Rumus yang digunakan:

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg I_{bf})$

Ia $= 10^{\lg Ia}$

lg En $= K_1 + K_2 + (1{,}081 \times \lg Ia) + 0{,}0011\ G$

En $= 10^{\lg En}$

E $= 4{,}184 \times C_f \times En \times \left(\frac{t}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^x}{D^x}\right)$

- Bus 1APD-MMC-1

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 16{,}79618) = 1{,}2084$

Ia $= 10^{1{,}2084} = 16{,}1585$ kA

lg En $= -0{,}555 + (1{,}081 \times 1{,}2084) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}8817$

En $= 10^{0{,}8817} = 7{,}6147$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 7{,}6147 \times (0{,}4/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{0{,}974}}\right)$

$= 42{,}9749$ J/cm^2 $= 10{,}2712$ cal/cm^2

- Bus Bus 1APD-MMC-1new

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 16{,}79618) = 1{,}2084$

Ia $= 10^{1{,}2084} = 16{,}1585$ kA

lg En $= -0{,}555 + (1{,}081 \times 1{,}2084) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}8817$

En $= 10^{0{,}8817} = 7{,}6147$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 7{,}6147 \times (0{,}4/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{0{,}974}}\right)$

$= 42{,}9749$ J/cm^2 $= 10{,}2712$ cal/cm^2

- Bus 1APD-MMC-2

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 16{,}79618) = 1{,}2084$

Ia $= 10^{1{,}2084} = 16{,}1585$ kA

lg En $= -0{,}555 + (1{,}081 \times 1{,}2084) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}8817$

En $= 10^{0{,}8817} = 7{,}6147$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 7{,}6147 \times (0{,}4/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{0{,}974}}\right)$

$= 42{,}9749$ J/cm^2 $= 10{,}2712$ cal/cm^2

- Bus-0076

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7599) = 1,1812

Ia = $10^{1,1812}$ = 15,1780 kA

lg En = -0,555 + (1,081×1,1812) + (0,0011 × 102)

= 0,8518

En = $10^{0,8518}$ = 7,1081 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 7,1081 × (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 40,1159 J/cm^2 = 9,5879 cal/cm^2

- Bus-0078

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7599) = 1,1812

Ia = $10^{1,1812}$ = 15,1780 kA

lg En = -0,555 + (1,081×1,1812) + (0,0011 × 102)

= 0,8518

En = $10^{0,8518}$ = 7,1081 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 7,1081 × (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 40,1159 J/cm^2 = 9,5879 cal/cm^2

- Bus-0080

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7381) = 1,1806

Ia = $10^{1,1806}$ = 15,1574 kA

lg En = -0,555 + (1,081×1,1806) + (0,0011 × 153)

= 0,8511

En = $10^{0,8511}$ = 7,0975 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 7,0975 × (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 40,0559 J/cm^2 = 9,5736 cal/cm^2

- Bus-0081

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7381) = 1,1806

Ia = $10^{1,1806}$ = 15,1574 kA

lg En = -0,555 + (1,081×1,1806) + (0,0011 × 153)

= 0,8511

En = $10^{0,8511}$ = 7,0975 J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,0975 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,0559$ J/cm^2 = 9,5736 cal/cm^2

- Bus-0082

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7919) = 1,1821$

Ia $= 10^{1,1821} = 15,2083$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,1821) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,8527$

En $= 10^{0,8527} = 7,1237$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,1237 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,2040$ J/cm^2 = 9,6090 cal/cm^2

- Bus-0083

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7849) = 1,1819$

Ia $= 10^{1,1819} = 15,2016$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,1819) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,8525$

En $= 10^{0,8525} = 7,1203$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,1203 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,1846$ J/cm^2 = 9,6044 cal/cm^2

- Bus-0084

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7849) = 1,1819$

Ia $= 10^{1,1819} = 15,2016$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,1819) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,8525$

En $= 10^{0,8525} = 7,1203$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,1203 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,1846$ J/cm^2 = 9,6044 cal/cm^2

- Bus17

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7746) = 1,1816$

Ia $= 10^{1,1816} = 15,1919$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,1816) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,8522$

En $= 10^{0,8522} = 7,1153$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,1153 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,1564$ J/cm^2 $= 9,5976$ cal/cm^2

- Bus20

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7746) = 1,1816$

Ia $= 10^{1,1816} = 15,1919$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,1816) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,8522$

En $= 10^{0,8522} = 7,1153$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,1153 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,1566$ J/cm^2 $= 9,5977$ cal/cm^2

Bus22

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7575) = 1,1812$

Ia $= 10^{1,1812} = 15,1758$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,1812) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,8517$

En $= 10^{0,8517} = 7,1070$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 7,1070 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 40,1095$ J/cm^2 $= 9,5864$ cal/cm^2

- Bus4

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 2.8931) = 0,4575$

Ia $= 10^{0,4575} = 2,8677$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 0,4575) + (0,0011 \times 153)$

$= 0,1120$

En $= 10^{0,1120} = 1,2943$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 1,2943 \times (0,2/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 3,6523$ J/cm^2 $= 0,8729$ cal/cm^2

- 11 kV BUS-1

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 33,5388) = 1,5036$

Ia $= 10^{1,5036} = 31,8885$ kA

lg En $= -0,555 + (1,081 \times 1,5036) + (0,0011 \times 153)$

= 1,2624

En = $10^{1,2624}$ = 18,2986 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 18,2986 × (0,9144/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 236,0780 J/cm^2 = 56,4240 cal/cm^2

- 11 kV BUS-2

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 32,2063) = 1,4876

Ia = $10^{1,4876}$ = 30,7361 kA

lg En = -0,555 + (1,4876×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,2448

En = $10^{1,2448}$ = 17,5727 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 17,5727× (2,8361/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 703,1745 J/cm^2 = 168,0627 cal/cm^2

- 11 kV BUS-3

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 38,2166) = 1,5594

Ia = $10^{1,5594}$ = 36,2555 kA

lg En = -0,555 + (1,5594×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,3237

En = $10^{1,3237}$ = 21,0724 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 21,0724 × (4,5086/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 1340,4747 J/cm^2 = 320,3811 cal/cm^2

- 11 kV BUS-4

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 38,2166) = 1,5594

Ia = $10^{1,5594}$ = 36,2555 kA

lg En = -0,555 + (1,5594×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,3237

En = $10^{1,3237}$ = 21,0724 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 21,0724× (9,4081/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 2797,1852 J/cm^2 = 668,3811 cal/cm^2

- BUS-0152

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 27,2976) = 1,4157

Ia = $10^{1,4517}$ = 26,0454 kA

lg En = -0,555 + (1,4517×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,1658
En = $10^{1,1658}$ = 14,6471 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 11,2914× (0,05/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 10,3329 J/cm^2 = 2,4696 cal/cm^2

- BUS-0212

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 33,2925) = 1,5005
Ia = $10^{1,5005}$ = 31,6582 kA
lg En = -0,555 + (1,5005×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,2590
En = $10^{1,2590}$ = 18,1533 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 13,9944× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 102,4516 J/cm^2 = 24,4865 cal/cm^2

- BUS-0213

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 36,6739) = 1,5418
Ia = $10^{1,5418}$ = 34,8163 kA
lg En = -0,555 + (1,5418×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,3044
En = $10^{1,3044}$ = 20,1544 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 20,1544× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 113,7448 J/cm^2 = 27,1857 cal/cm^2

- BUS-0214

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 30,1698) = 1,4584
Ia = $10^{1,4584}$ = 28,7369 kA
lg En = -0,555 + (1,4584×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,2127
En = $10^{1,2127}$ = 16,3119 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 16,3119× (2,453/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 564,8522 J/cm^2 = 135,0029 cal/cm^2

- BUS-0215

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 37,5863) = 1,5523

Ia = $10^{1,5523}$ = 35,6676 kA

lg En = -0,555 + (1,5523×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,3159

En = $10^{1,3159}$ = 20,6970 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 15,9553× (4,276/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 1248,9305 J/cm^2 = 298,5015 cal/cm^2

- BUS-0216

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 37,7925) = 1,5546

Ia = $10^{1,5546}$ = 35,8600 kA

lg En = -0,555 + (1,5546×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,3185

En = $10^{1,3185}$ = 20,8197 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 20,8197× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 117,4999 J/cm^2 = 28,0832 cal/cm^2

- BUS-0221

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 27,0835) = 1,4124

Ia = $10^{1,4124}$ = 25,8445 kA

lg En = -0,555 + (1,4124×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,1621

En = $10^{1,1621}$ = 14,5229 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 14,5229× (0,05/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 10,2453 J/cm^2 = 2,4487 cal/cm^2

- BUS-0254

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 27,4199) = 1,4176

Ia = $10^{1,4176}$ = 26,1601 kA

lg En = -0,555 + (1,4176×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,1678

En = $10^{1,1678}$ = 14,7180 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 14,7180× (1,168/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 242,7271 J/cm^2 = 58,0132 cal/cm^2

- Bus15

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 20,3592) = 1,2905

Ia = $10^{1,2905}$ = 19,5223 kA

lg En = -0,555 + (1,2905×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,0281

En = $10^{1,0281}$ = 10,6677 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 10,6677× (0,05/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 7,5256 J/cm^2 = 1,7987 cal/cm^2

- Bus9

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 27,0620) = 1,4120

Ia = $10^{1,4120}$ = 25,8244 kA

lg En = -0,555 + (1,4120×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,1617

En = $10^{1,1617}$ = 14,5105 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 14,5105× (0,05/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 10,2365 J/cm^2 = 2,4466 cal/cm^2

- BOC-PLN

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 20,9266) = 1,3023

Ia = $10^{1,3023}$ = 20,0571 kA

lg En = -0,555 + (1,3023×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,0410

En = $10^{1,410}$ = 10,9894 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 10,9894× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 62,0209 J/cm^2 = 14,8233 cal/cm^2

- BOC-PLN-2

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 20,9266) = 1,3023

Ia = $10^{1,3023}$ = 20,0571 kA

lg En = -0,555 + (1,3023×1,1) + (0,0011 × 153)

= 1,0410

En = $10^{1,410}$ = 10,9894 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 10,9894× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

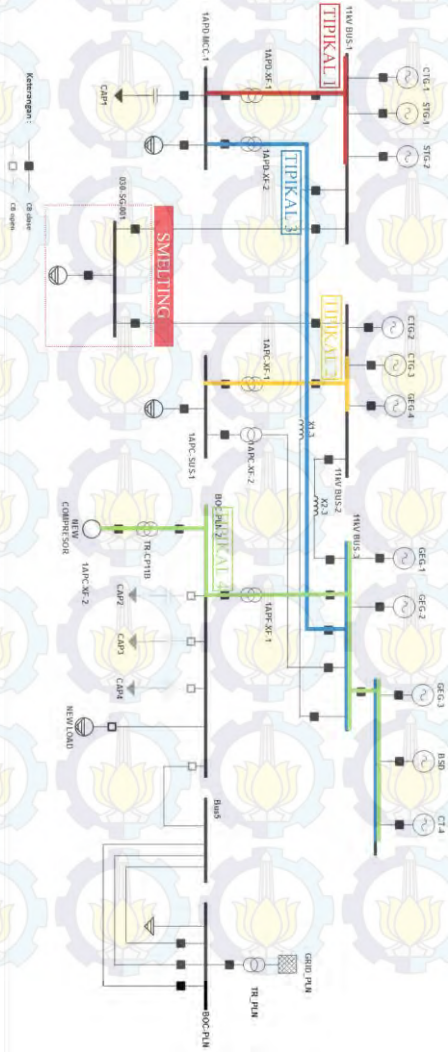
= 62,0209 J/cm^2 = 14,8233 cal/cm^2

Berdasarkan hasil perhitungan diatas dapat dilihat bahwa apabila terjadi *fault* pada tiap-tiap bus akan menghasilkan total energi busur api yang melebihi kategori adalah sebesar 668,5433 cal/cm² pada bus 11 kV BUS-4, sebesar 320,3811 cal/cm² pada bus 11 kV BUS-3, sebesar 298,5015 cal/cm² pada bus BUS-0215, sebesar 168,0627 cal/cm² pada bus 11 kV BUS-2, sebesar 58,0132 cal/cm² pada bus BUS-0254, sebesar 56,4240 cal/cm² pada bus 11 kV BUS-1 . Energi sebesar ini dikarenakan FCT (*fault clearing time*) pada bus 11 kV BUS-4 sangat besar mencapai 9,4081 detik, pada 11 kV BUS-3 mencapai 4,5086 detik, pada BUS-0215 mencapai 4,2769 detik, pada 11 kV BUS-2 mencapai 2,8361 detik, pada BUS-0254 mencapai 1,1688 detik, pada 11 kV BUS-1 mencapai 0,9144 detik. Energi tersebut tergolong sangat besar dan termasuk kategori > 4 (exceeds Max. PPE Arc Rating). Berdasarkan standart IEEE pada kategori tersebut tidak ada PPE untuk melindungi pekerja karena kategori energi busur api bus 11 kV BUS-4 melebihi batas standar. Kondisi seperti ini tentu sangat berbahaya bagi pekerja apabila melakukan maintenance terhadap bus tersebut dan dalam standar IEEE mengenai Arc Flash Hazard Assessment Requirement dinyatakan bahwa "sebagian besar pekerjaan harus dilakukan melalui remote atau jarak jauh atau tidak sama sekali. Tidak ada personel protective equipment pada tabel NFPA 70E yang mampu melindungi dari energi busur api pada tingkat ini. Ledakan yang ditimbulkan busur api bisa menjadi masalah yang besar pada level ini"[9].

Untuk total energi busur api terkecil adalah 668,5433 cal/cm². Energi sebesar ini dikarenakan FCT (*fault clearing time*) dari bus 11 kV BUS-4 sangat besar mencapai 9,4081 detik. Energi tersebut tergolong sangat besar dan termasuk kategori > 4 (exceeds Max. PPE Arc Rating). Berdasarkan standart IEEE pada kategori tersebut tidak ada PPE untuk melindungi pekerja karena kategori energi busur api bus 11 kV BUS-4 melebihi batas standar. Kondisi seperti ini tentu sangat berbahaya bagi pekerja apabila melakukan maintenance terhadap bus tersebut dan dalam standar IEEE mengenai Arc Flash Hazard Assessment Requirement dinyatakan bahwa "sebagian besar pekerjaan harus dilakukan melalui remote atau jarak jauh atau tidak sama sekali. Tidak ada personel protective equipment pada tabel NFPA 70E yang mampu melindungi dari energi busur api pada tingkat ini. Ledakan yang ditimbulkan busur api bisa menjadi masalah yang besar pada level ini"[9].

4.3 *Resetting* Rele Pengaman Fasa

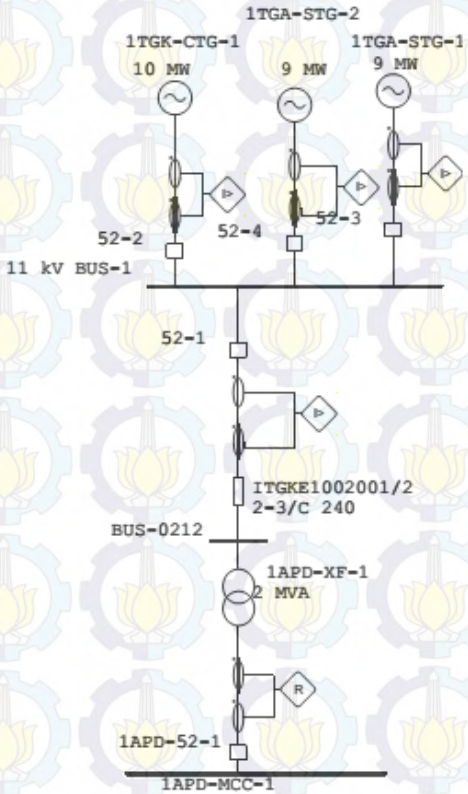
Koordinasi yang belum tepat akan mempengaruhi besarnya nilai energi busur api, karena itu perlu dilakukan resetting rele pengaman. Ada lima tipikal yang akan diambil untuk resetting. Keempat tipikal ini akan mewakili koordinasi sistem keseluruhan.



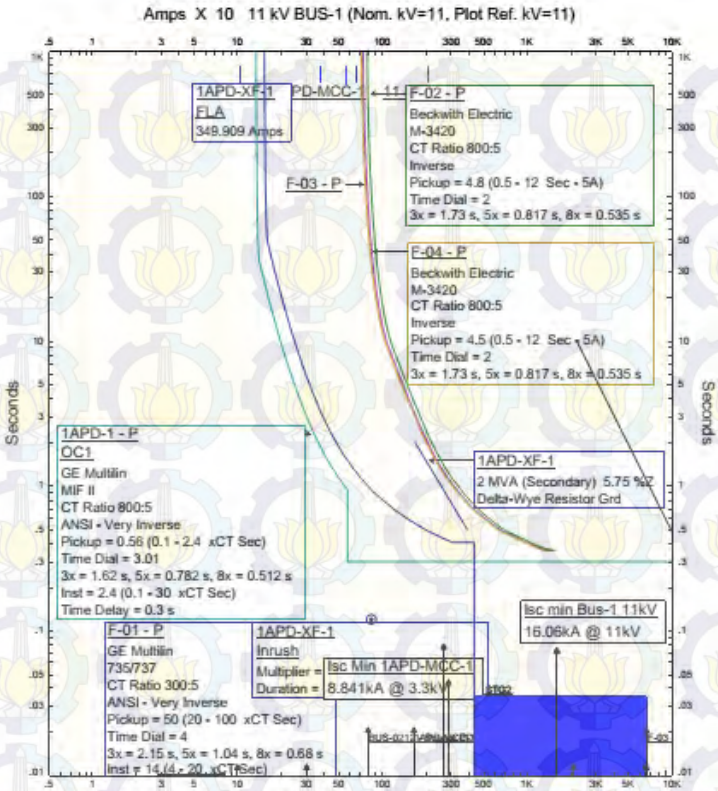
Gambar 4.1 Tipikal yang diambil untuk *resetting*

4.3.1 Rele Pengaman Fasa Tipikal 1

Tipikal ini dimulai dari Generator 1TGK-CTG-1, 1TGA-STG-2, 1TGA-STG-1 sampai dengan trafo 1APD-XF-1. Pemilihan berdasarkan beban terjauh dibagian tegangan menengah yang mendapat suplai generator 1TGK-CTG-1, 1TGA-STG-2, 1TGA-STG-1. Gambar 4.2 memperlihatkan rangkaian tipikal 1.



Gambar 4.2 Rangkaian tipikal 1



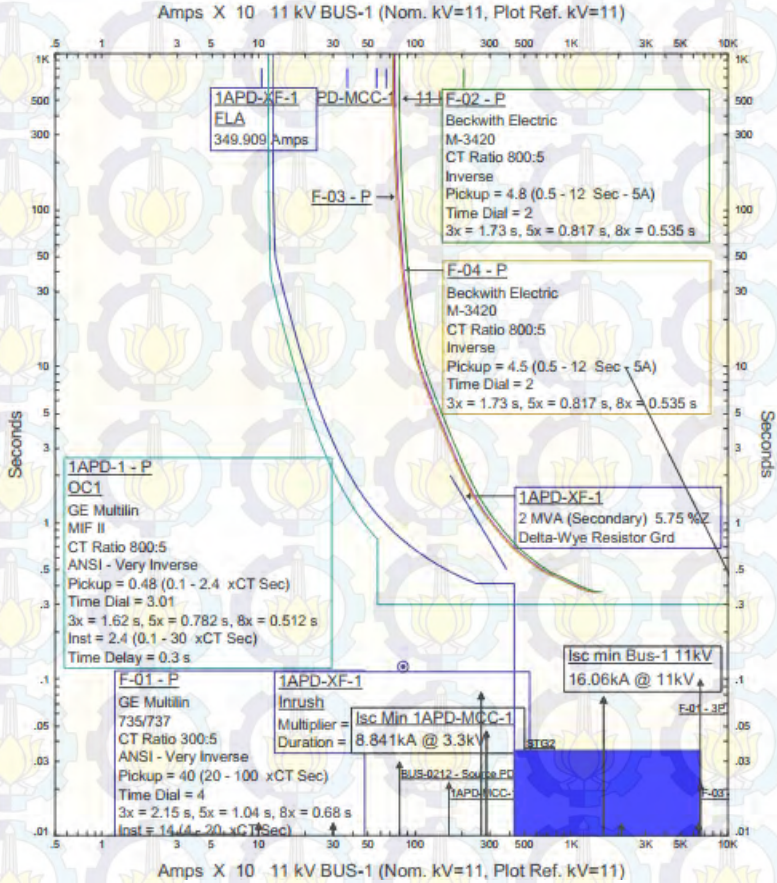
Gambar 4.3 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 1

Pada Gambar diatas dapat terlihat bahwa *setting* kurva koordinasi dari rele F-01 dan 1APD-1 tidak sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva lebih dari 1,3 x FLA trafo 1APD-XF-1 maka perlu dilakukan setting ulang, karena saat trafo 1APD-XF-1 terjadi overload maka rele akan lebih lama bekerja sehingga rele F-01 dan 1APD-1 perlu dilakukan setting ulang.

4.3.1.1 *Resetting* Tipikal 1

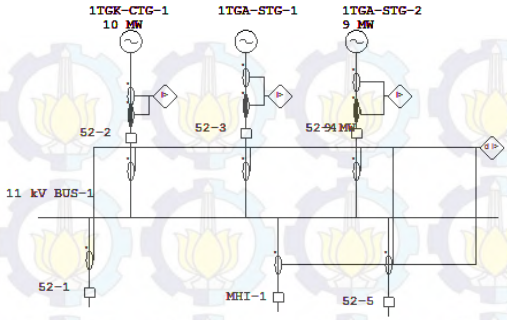
Pada Gambar diatas dapat terlihat bahwa setting kurva koordinasi dari rele F-01 dan 1APD-1 tidak sesuai dengan BS 142 karena

setting low-set yang terdapat dalam kurva lebih dari 1,3 x FLA trafo maka perlu dilakukan setting ulang perlu dilakukan setting ulang.



Gambar 4.4 *Time-Current Curve resetting* dari tipikal 1

Pada tipikal 1 selain menggunakan setelan rele arus lebih yang telah dilakukan sebelumnya juga menggunakan rele differential. Hal tersebut dilakukan untuk mengurangi nilai *incident energy* busur api pada bus dengan level tegangan 11 kV agar menjadi lebih kecil dibandingkan pada kondisi eksisting. Sehingga dengan adanya penambahan rele tersebut, konfigurasi menjadi seperti dibawah ini.



Gambar 4.5 Penambahan rele *differential* pada bus 11 KV BUS-1 tipikal 1

Berdasarkan rekomendasi IEEE, rele diferensial beroperasi dari 1 *cycle* hingga 3 *cycle*. Berikut merupakan *setting operating time rele differential* dengan frekuensi 50 Hz.

- Perhitungan untuk 1 *cycle*

waktu = *cycle*/frekuensi = 1/50 = 0,02 s

- Perhitungan untuk 2 *cycle*

waktu = *cycle*/frekuensi = 2/50 = 0,04 s

- Perhitungan untuk 3 *cycle*

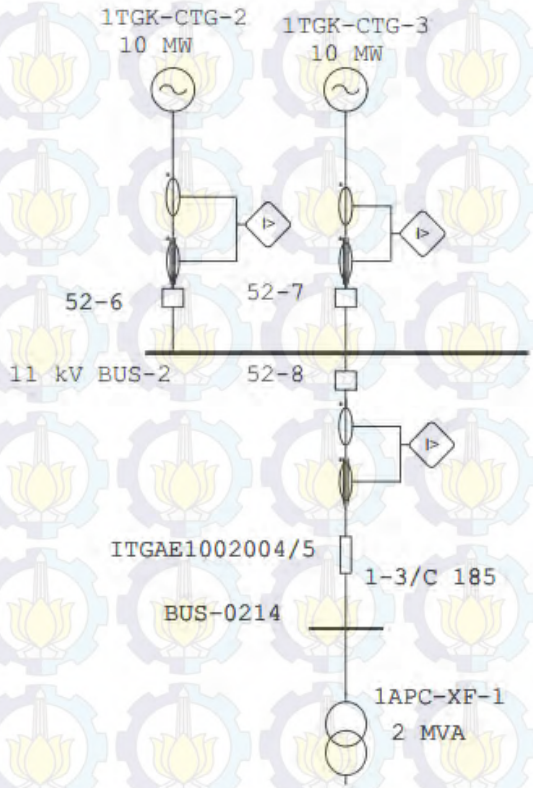
waktu = *cycle*/frekuensi = 3/50 = 0,06 s

Dari perhitungan diatas maka *setting* waktu yang digunakan adalah 2 *cycle* atau 0,04 s. Hal tersebut sesuai dengan datasheet rele yaitu ALSTOM tipe CAG34 yang mempunyai waktu operasi minimal 0,025 s. Dari data resetting rele diatas, selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *star protective device coordination* pada software ETAP untuk mengetahui waktu kerja rele pengaman.

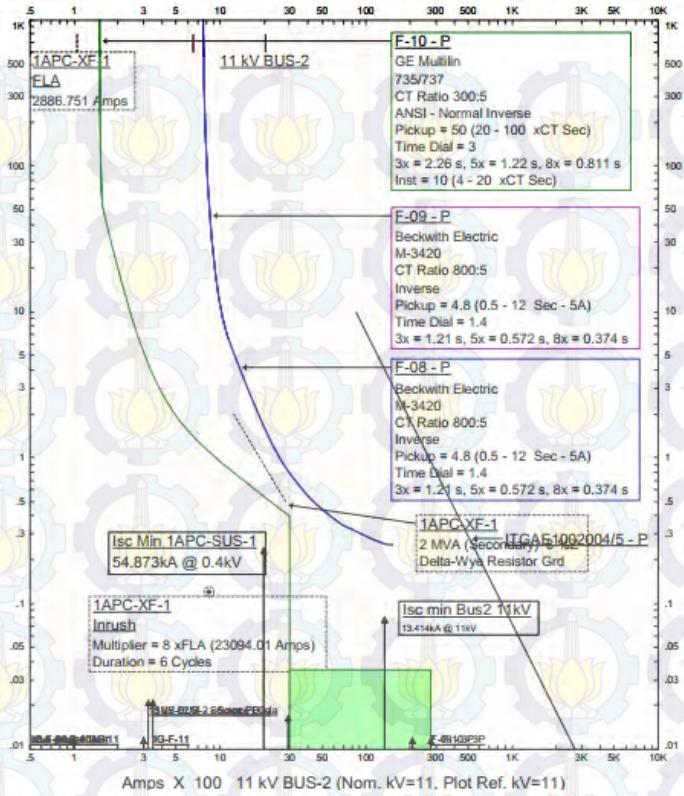
Karena pada 11KV BUS-1 belum diketanahkan atau menggunakan HRG *(high resistance grounded)* maka perlu dilakukan penambahan atau penggantian tipe *grounding*-nya untuk mengurangi nilai dari *incident energy* busur api pada 11KV BUS-1.

4.3.2 Rele Pengaman Fasa Tipikal 2

Tipikal ini dimulai dari Generator 1TGK-CTG-2 dan 1TGA-CTG-3 sampai dengan trafo 1APC-XF-1. Pada tipikal 2 terdapat tiga rele arus lebih yang dilakukan resetting diantaranya adalah rele F-10-P, F-09-P, dan F-08-P.



Gambar 4.6 Rangkaian tipikal 2



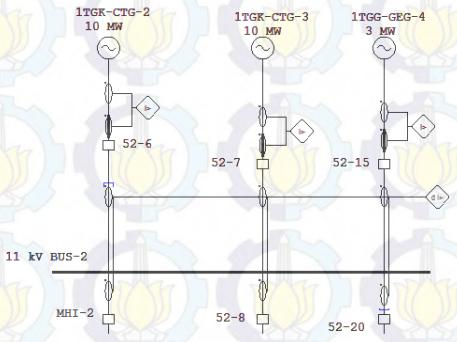
Gambar 4.7 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 2

Pada Gambar diatas dapat terlihat bahwa *setting* kurva koordinasi dari rele F-10-P tidak sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva lebih dari 1,3 x FLA trafo 1APC-XF1 maka perlu dilakukan setting ulang.

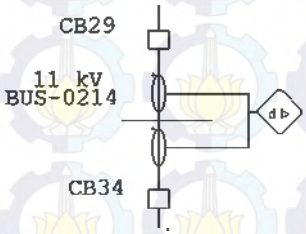
4.3.2.1 *Resetting* Tipikal 2

Pada tipikal 2 selain menggunakan setelan rele arus lebih yang perlu dilakukan juga menambahkan rele differential pada 11 kv BUS-1 dan BUS-0214. Hal tersebut dilakukan untuk mengurangi nilai *incident energy* busur api pada bus dengan level tegangan 11 kV agar menjadi

lebih kecil dibandingkan pada kondisi eksisting. Sehingga dengan adanya penambahan rele tersebut, konfigurasi menjadi seperti dibawah ini.



Gambar 4.8 Penambahan rele *differential* pada bus 11 KV BUS-2 tipikal 2



Gambar 4.9 Penambahan rele *differential* pada bus BUS-0214 tipikal 2

Berdasarkan rekomendasi IEEE, rele diferensial beroperasi dari 1 *cycle* hingga 3 *cycle*. Berikut merupakan *setting operating time rele differential* dengan frekuensi 50 Hz.

- Perhitungan untuk 1 *cycle*

waktu = $cycle$/frekuensi = 1/50 = 0,02 s

- Perhitungan untuk 2 *cycle*

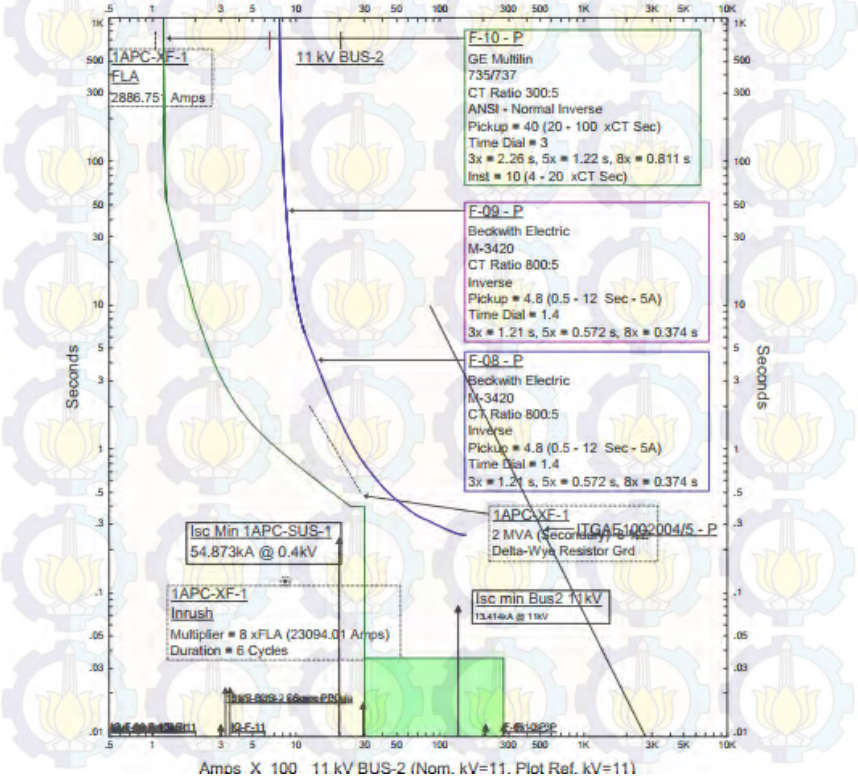
waktu = $cycle$/frekuensi = 2/50 = 0,04 s

- Perhitungan untuk 3 *cycle*

waktu = $cycle$/frekuensi = 3/50 = 0,06 s

Dari perhitungan diatas maka *setting* waktu yang digunakan adalah 2 *cycle* atau 0,04 s. Hal tersebut sesuai dengan datasheet rele yaitu ALSTOM tipe CAG34 yang mempunyai waktu operasi minimal 0,025 s. Dari data resetting rele diatas, selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *star protective device coordination* pada software ETAP untuk mengetahui waktu kerja rele pengaman.

Karena pada 11KV BUS-2 dan BUS-0214 belum diketanahkan atau menggunakan HRG *(high resistance grounded)* maka perlu dilakukan penambahan atau penggantian tipe *grounding*-nya untuk mengurangi nilai dari *incident energy* busur api pada 11KV BUS-2.

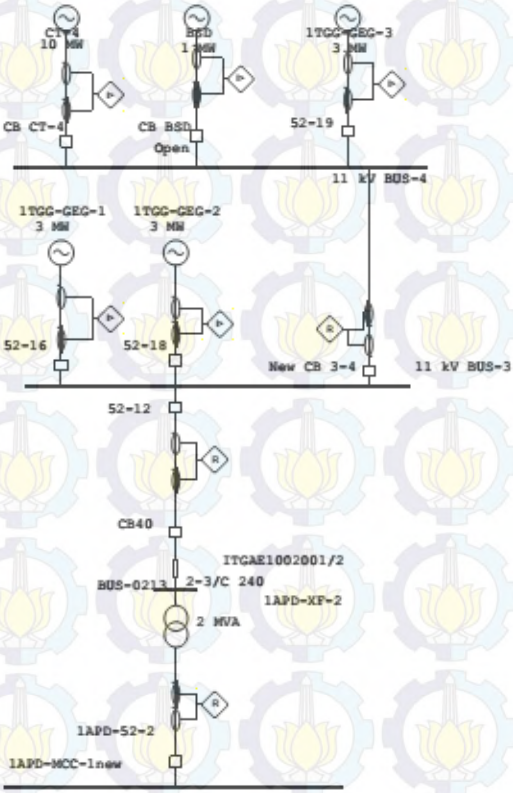


Gambar 4.10 *Time-Current Curve resetting* dari tipikal 2

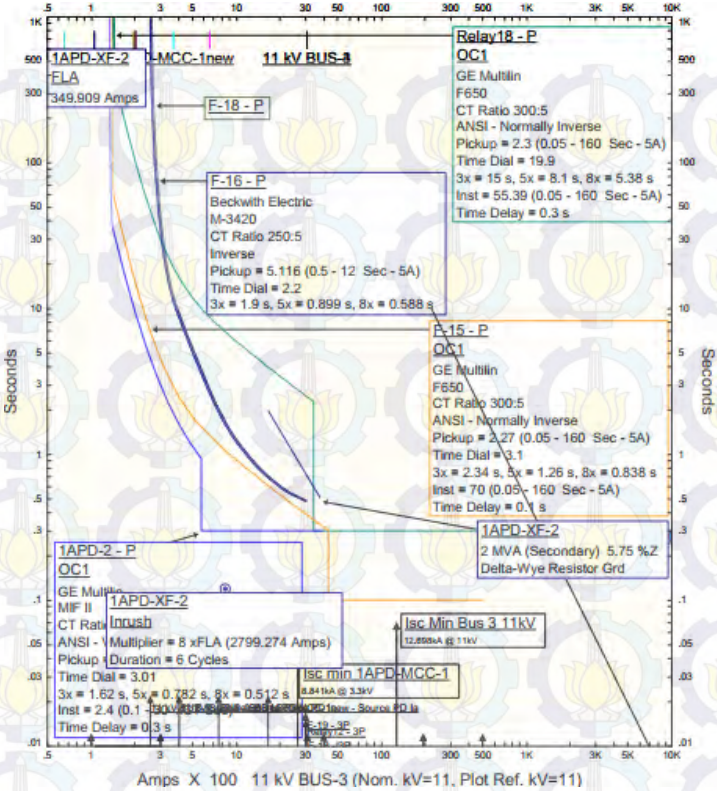
Setelah dilakukan resetting pada rele F-10-P terlihat terlihat bahwa setting kurva koordinasi dari rele F-10-P sudah sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva sudah berada dalam 1,05 - 1,3 x FLA trafo 1APC-XF1.

4.3.3 Rele Pengaman Fasa Tipikal 3

Tipikal ini dimulai dari Generator CT-4, BSD, 1TGG-GEG-3, 1TGG-GEG-1 dan 1TGG-GEG-2 sampai dengan trafo 1APD-XF-2. Pada tipikal 2 terdapat tiga rele arus lebih yang dilakukan resetting diantaranya adalah rele 1APD-2-P, F-15-P, F-16-P, Relay 18-P, Relay 10-P dan Relay 12-P



Gambar 4.11 Rangkaian tipikal 3

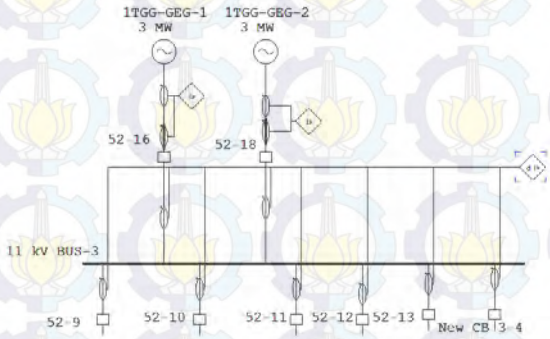


Gambar 4.12 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 3

Pada Gambar diatas dapat terlihat bahwa *setting* kurva koordinasi dari rele Relay10 tidak sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva lebih dari 1,3 x FLA generator BSD maka perlu dilakukan setting ulang, *setting* kurva koordinasi dari rele Relay12 tidak sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva kurang dari 1,05 x FLA generator CT-4 maka perlu dilakukan setting ulang dan *setting* kurva koordinasi dari rele Relay18 tidak sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva kurang dari 1,05 x FLA generator CT-4 + BSD + 1TGG-GEG-3 karena saat ketiga generator tersebut bekerja maka rele Relay18 akan trip maka perlu dilakukan setting ulang.

4.3.3.1 *Resetting* Tipikal 3

Pada tipikal 3 selain menggunakan setelan rele arus lebih yang perlu dilakukan juga menambahkan rele differential. Hal tersebut dilakukan untuk mengurangi nilai *incident energy* busur api pada bus dengan level tegangan 11 kV agar menjadi lebih kecil dibandingkan pada kondisi eksisting. Sehingga dengan adanya penambahan rele tersebut, konfigurasi menjadi seperti dibawah ini.



Gambar 4.13 Penambahan rele *differential* pada bus 11 KV BUS-3 tipikal 3

Berdasarkan rekomendasi IEEE, rele diferensial beroperasi dari 1 *cycle* hingga 3 *cycle*. Berikut merupakan *setting operating time rele differential* dengan frekuensi 50 Hz.

- Perhitungan untuk 1 *cycle*

waktu = *cycle*/frekuensi = 1/50 = 0,02 s

- Perhitungan untuk 2 *cycle*

waktu = *cycle*/frekuensi = 2/50 = 0,04 s

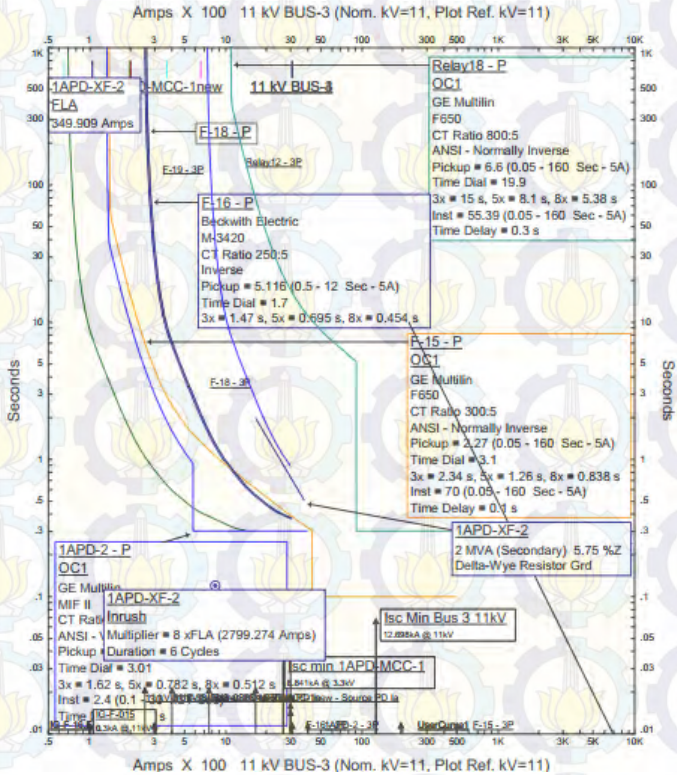
- Perhitungan untuk 3 *cycle*

waktu = *cycle*/frekuensi = 3/50 = 0,06 s

Dari perhitungan diatas maka *setting* waktu yang digunakan adalah 2 *cycle* atau 0,04 s. Hal tersebut sesuai dengan datasheet rele yaitu ALSTOM tipe CAG34 yang mempunyai waktu operasi minimal 0,025 s.

Dari data resetting rele diatas, selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *star protective device coordination* pada software ETAP untuk mengetahui waktu kerja rele pengaman.

Karena pada 11KV BUS-3 belum diketanahkan atau menggunakan HRG *(high resistance grounded)* maka perlu dilakukan penambahan atau penggantian tipe *grounding*-nya untuk mengurangi nilai dari *incident energy* busur api pada 11KV BUS-3.



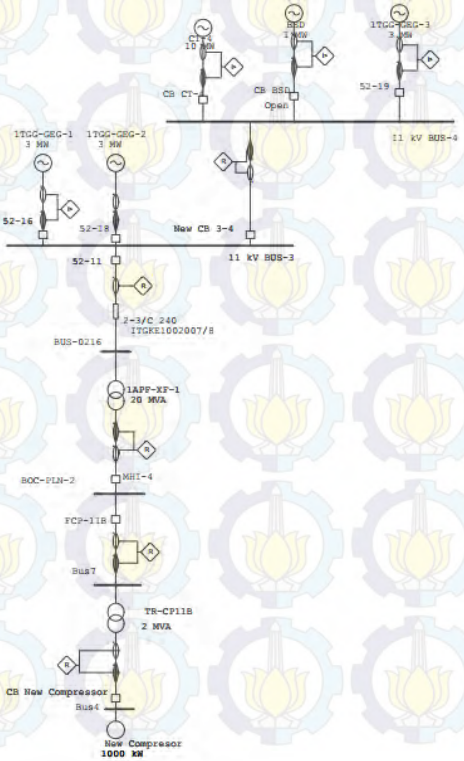
Gambar 4.14 *Time-Current Curve resetting* dari tipikal 3

Setelah dilakukan resetting pada rele Relay10, Relay12, dan Relay18 terlihat bahwa setting kurva koordinasi dari rele Relay10 sudah sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva sudah berada dalam 1,05 - 1,3 x FLA generator BSD, setting kurva

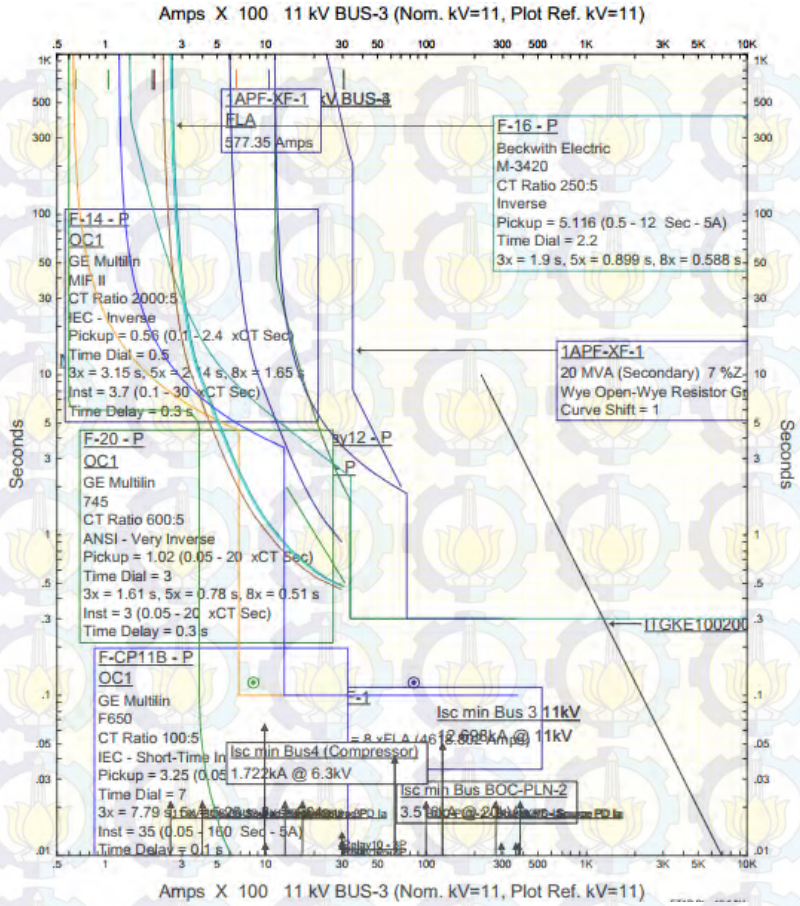
koordinasi dari rele Relay12 sudah sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva sudah berada dalam 1,05 - 1,3 x FLA generator CT-4 , dan setting kurva koordinasi dari rele Relay18 sudah sesuai dengan BS 142 karena setting low-set yang terdapat dalam kurva sudah berada dalam 1,05 - 1,3 x FLA generator CT-4 + BSD + 1TGG-GEG-3.

4.3.4 Rele Pengaman Fasa Tipikal 4

Tipikal ini dimulai dari Generator CT-4, BSD, 1TGG-GEG-3, 1TGG-GEG-1 dan 1TGG-GEG-2 sampai dengan trafo 1APD-XF-2. Pada tipikal 2 terdapat tiga rele arus lebih yang dilakukan resetting diantaranya adalah rele 1APD-2-P, F-15-P, F-16-P, Relay 18-P, Relay 10-P dan Relay 12-P



Gambar 4.15 Rangkaian tipikal 4

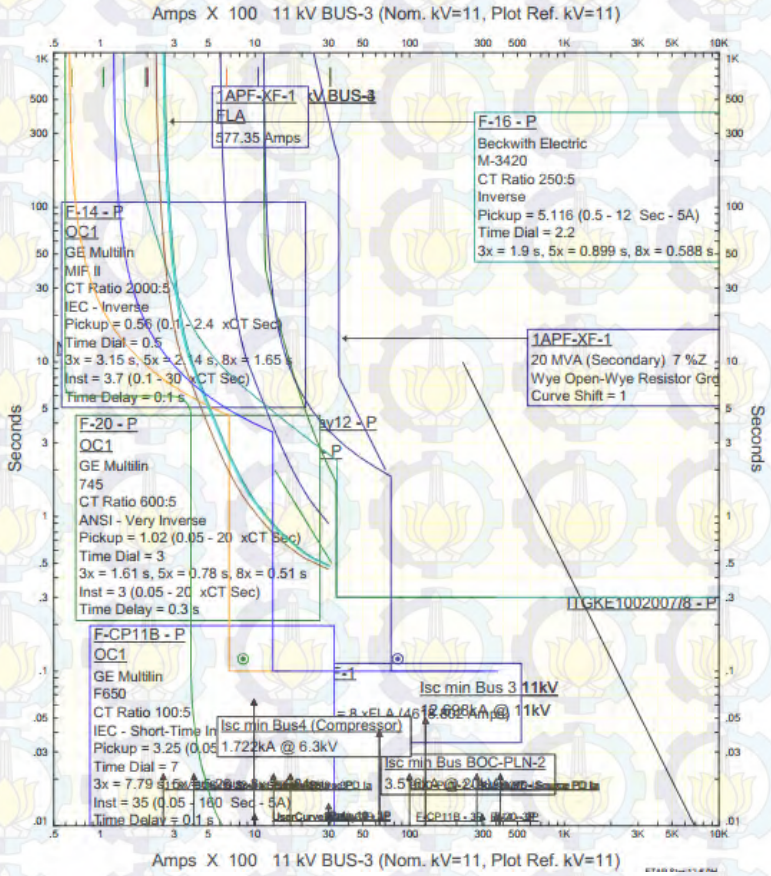


Gambar 4.16 *Time-Current Curve* eksisting dari tipikal 3

Pada Gambar diatas dapat terlihat bahwa *setting time delay* rele F-14 tidak sesuai dengan karena *setting time delay* dari rele F-14 adalah 0,3 detik dapat diketahui bahwa rele F-14 merupakan rele pangaman utama untuk trafo 1APF-XF-1 maka *time delay* dari rele seharusnya 0,1 detik.

4.3.4.1 *Resetting* Tipikal 4

Pada tipikal 4 kita perlu *resetting* untuk *time delay* dari rele F-14 dari 0,3 detik ke 0,1 detik. Hal ini bertujuan untuk mempercepat waktu kerja rele saat terjadi gangguan pada trafo 1APF-XF-1.



Gambar 4.17 *Time-Current Curve resetting* dari tipikal 3

4.4 Nilai Energi Busur Api dengan Data *Resetting*

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai nilai dari energi insiden busur api dengan kondisi *resetting*. Nilai yang akan dicari ialah *Arc Flash Current* dan Energi Insiden Busur Api. Data yang diperlukan dalam perhitungan ini dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 4.2 Data bus untuk perhitungan energi busur api kondisi *resetting*

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	Work Distance (mm)	Gap (mm)	X factor
1APD-MCC-1	3,3	16,80	0,40	914,4	102	0,973
1APD-MCC-1new	3,3	16,80	0,40	914,4	102	0,973
1APD-MCC-2	3,3	16,80	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0076	3,3	15,76	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0078	3,3	15,76	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0080	3,3	15,74	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0081	3,3	15,74	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0082	3,3	15,79	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0083	3,3	15,78	0,40	914,4	102	0,973
BUS-0084	3,3	15,78	0,40	914,4	102	0,973
Bus17	3,3	15,77	0,40	914,4	102	0,973
Bus20	3,3	15,77	0,40	914,4	102	0,973
Bus22	3,3	15,76	0,40	914,4	102	0,973
Bus4	6,3	2,89	0,20	914,4	153	0,973
11 kV BUS-1	11	33,54	0,04	914,4	153	0,973
11 kV BUS-2	11	32,31	0,04	914,4	153	0,973
11 kV BUS-3	11	38,22	0,04	914,4	153	0,973
11 kV BUS-4	11	38,22	0,04	914,4	153	0,973
BUS-0152	11	27,30	0,05	914,4	153	0,973
BUS-0212	11	33,29	0,40	914,4	153	0,973
BUS-0213	11	36,67	0,40	914,4	153	0,973
BUS-0214	11	30,17	2,45	914,4	153	0,973
BUS-0215	11	37,59	4,28	914,4	153	0,973
BUS-0216	11	37,79	0,40	914,4	153	0,973

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	Work Distance (mm)	Gap (mm)	X factor
BUS-0221	11	27,08	0,05	914,4	153	0,973
BUS-0254	11	27,42	1,17	914,4	153	0,973
Bus15	11	20,36	0,05	914,4	153	0,973
Bus9	11	27,06	0,05	914,4	153	0,973

Perhitungan untuk masing – masing bus dapat dilihat sebagai berikut:

a. Perhitungan energi busur api di bus dengan level tegangan 1 – 15 kV

Rumus yang digunakan:

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg I_{bf})

Ia = $10^{\lg Ia}$

lg En = $K_1 + K_2$ + (1,081 × lg Ia) + 0,0011 G

En = $10^{\lg En}$

E = 4,184 × C_f × En × $\left(\frac{t}{0,2}\right)\left(\frac{610^x}{D^x}\right)$

- Bus 1APD-MMC-1

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 16,79618) = 1,2084

Ia = $10^{1,2084}$ = 16,1585 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,081×1,2084) + (0,0011 × 102)
= 0,7687

En = $10^{0,7687}$ = 5,8702 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 5,8702× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 33,1295 J/cm^2 = 7,9181 cal/cm^2

- Bus Bus 1APD-MMC-1new

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 16,79618) = 1,2084

Ia = $10^{1,2084}$ = 16,1585 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,081×1,2084) + (0,0011 × 102)
= 0,7687

En = $10^{0,7687}$ = 5,8702 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 5,8702× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 33,1295 J/cm^2 = 7,9181 cal/cm^2

- Bus 1APD-MMC-2

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 16,79618) = 1,2084

Ia = $10^{1,2084}$ = 16,1585 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,081×1,2084) + (0,0011 × 102)
= 0,7687

En = $10^{0,7687}$ = 5,8702 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 5,8702× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 33,1295 J/cm^2 = 7,9181 cal/cm^2

- Bus-0076

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7599) = 1,1812

Ia = $10^{1,1812}$ = 15,1780 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,081×1,1812) + (0,0011 × 102)
= 0,7388

En = $10^{0,7388}$ = 5,4797 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 5,4797 × (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 30,9255 J/cm^2 = 7,3914 cal/cm^2

- Bus-0078

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7599) = 1,1812

Ia = $10^{1,1812}$ = 15,1780 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,081×1,1812) + (0,0011 × 102)
= 0,7388

En = $10^{0,7388}$ = 5,4797 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 5,4797 × (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 30,9255 J/cm^2 = 7,3914 cal/cm^2

- Bus-0080

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 15,7381) = 1,1806

Ia = $10^{1,1806}$ = 15,1574 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,081×1,1806) + (0,0011 × 102)
= 0,7381

En = $10^{0,7281}$ = 5,4715 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 5,4715 × (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 30{,}8793\ J/cm^2 = 7{,}3803\ cal/cm^2$

- Bus-0081

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 15{,}7381) = 1{,}1806$

Ia $= 10^{1{,}1806} = 15{,}1574$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}081 \times 1{,}1806) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}7381$

En $= 10^{0{,}7281} = 5{,}4715\ J/cm^2$

E $= 4{,}184 \times 1 \times 5{,}4715 \times (0{,}4/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 30{,}8793\ J/cm^2 = 7{,}3803\ cal/cm^2$

- Bus-0082

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 15{,}7919) = 1{,}1821$

Ia $= 10^{1{,}1821} = 15{,}2083$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}081 \times 1{,}1821) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}7397$

En $= 10^{0{,}7397} = 5{,}4917\ J/cm^2$

E $= 4{,}184 \times 1 \times 5{,}4917 \times (0{,}4/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 30{,}9934\ J/cm^2 = 7{,}4076\ cal/cm^2$

- Bus-0083

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 15{,}7849) = 1{,}1819$

Ia $= 10^{1{,}1819} = 15{,}2016$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}081 \times 1{,}1819) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}7395$

En $= 10^{0{,}7395} = 5{,}4891\ J/cm^2$

E $= 4{,}184 \times 1 \times 5{,}4891 \times (0{,}4/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 30{,}9785\ J/cm^2 = 7{,}4040\ cal/cm^2$

- Bus-0084

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 15{,}7849) = 1{,}1819$

Ia $= 10^{1{,}1819} = 15{,}2016$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}081 \times 1{,}1819) + (0{,}0011 \times 102)$

$= 0{,}7395$

En $= 10^{0{,}7395} = 5{,}4891\ J/cm^2$

E $= 4,184 \times 1 \times 5,4891 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 30,9785$ J/cm^2 = 7,4040 cal/cm^2

- Bus17

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7746) = 1,1816$

Ia $= 10^{1,1816} = 15,1919$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,1816) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,7392$

En $= 10^{0,7392} = 5,4852$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 5,4852 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 30,9567$ J/cm^2 = 7,3988 cal/cm^2

- Bus20

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7746) = 1,1816$

Ia $= 10^{1,1816} = 15,1919$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,1816) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,7392$

En $= 10^{0,7392} = 5,4852$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 5,4852 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 30,9567$ J/cm^2 = 7,3988 cal/cm^2

- Bus22

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 15,7575) = 1,1812$

Ia $= 10^{1,1812} = 15,1758$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 1,1812) + (0,0011 \times 102)$

$= 0,7387$

En $= 10^{0,7387} = 5,4788$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 5,4788 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 30,9205$ J/cm^2 = 7,3902 cal/cm^2

- Bus4

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 2.8931) = 0,4575$

Ia $= 10^{0,4575} = 2,8677$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,081 \times 0,4575) + (0,0011 \times 153)$

$= -0,0010$

En $= 10^{-.0010} = 0{,}9978$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 0{,}9978 \times (0{,}2/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 2{,}8156$ J/cm^2 = 0,6729 cal/cm^2

- 11 kV BUS-1

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 33{,}5388) = 1{,}5036$

Ia $= 10^{1{,}5036} = 31{,}8885$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}081 \times 1{,}5036) + (0{,}0011 \times 153)$

$= 1{,}1494$

En $= 10^{1{,}1494} = 14{,}1064$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 14{,}1064 \times (0{,}04/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 7{,}9612$ J/cm^2 = 1,9028 cal/cm^2

- 11 kV BUS-2

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 32{,}2063) = 1{,}4876$

Ia $= 10^{1{,}4876} = 30{,}7361$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}4876 \times 1{,}1) + (0{,}0011 \times 153)$

$= 1{,}1318$

En $= 10^{1{,}1318} = 13{,}5468$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 13{,}5468 \times (0{,}04/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 7{,}6454$ J/cm^2 = 1,8273 cal/cm^2

- 11 kV BUS-3

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 38{,}2166) = 1{,}5594$

Ia $= 10^{1{,}5594} = 36{,}2555$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}5594 \times 1{,}1) + (0{,}0011 \times 153)$

$= 1{,}2107$

En $= 10^{1{,}2107} = 16{,}2448$ J/cm^2

E $= 4{,}184 \times 1 \times 16{,}2448 \times (0{,}04/0{,}2) \times \left(\frac{610^{0{,}973}}{914{,}4^{1{,}973}}\right)$

$= 9{,}1680$ J/cm^2 = 2,1912 cal/cm^2

- 11 kV BUS-4

lg Ia $= 0{,}00404 + (0{,}983 \times \lg 38{,}2166) = 1{,}5594$

Ia $= 10^{1{,}5594} = 36{,}2555$ kA

lg En $= -0{,}555 - 0{,}113 + (1{,}5594 \times 1{,}1) + (0{,}0011 \times 153)$

$= 1,2107$

En $= 10^{1,2107} = 16,2448$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 16,2448 \times (0,04/0,2) \times \left(\frac{610^{0,975}}{914,4^{1,974}}\right)$

$= 9,1680$ J/cm^2 = 2,1912 cal/cm^2

- BUS-0152

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 27,2976) = 1,4157$

Ia $= 10^{1,4517} = 26,0454$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,4517 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 1,0527$

En $= 10^{1,0527} = 11,2915$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 11,2915 \times (0,05/0,2) \times \left(\frac{610^{0,975}}{914,4^{1,974}}\right)$

$= 7,9657$ J/cm^2 = 1,9038 cal/cm^2

- BUS-0212

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 33,2925) = 1,5005$

Ia $= 10^{1,5005} = 31,6582$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,5005 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 1,1459$

En $= 10^{1,1459} = 13,9945$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 13,9945 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,975}}{914,4^{1,974}}\right)$

$= 78,9803$ J/cm^2 = 18,8767 cal/cm^2

- BUS-0213

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 36,6739) = 1,5418$

Ia $= 10^{1,5418} = 34,8163$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,5418 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 1,1914$

En $= 10^{1,1914} = 15,5371$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 15,5371 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,975}}{914,4^{1,974}}\right)$

$= 87,6863$ J/cm^2 = 20,9575 cal/cm^2

- BUS-0214

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 30,1698) = 1,4584$

Ia $= 10^{1,4584} = 28,7369$ kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,4584×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,0997

En = $10^{1,0997}$ = 12,5810 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 15,5370× (0,04/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 7,1003 J/cm^2 = 1,6970 cal/cm^2

- BUS-0215

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 37,5863) = 1,5523

Ia = $10^{1,5523}$ = 35,6676 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,5523×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,2029

En = $10^{1,2029}$ = 15,9553 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 15,9553× (4,276/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 962,8048 J/cm^2 = 230,1159 cal/cm^2

- BUS-0216

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 37,7925) = 1,5546

Ia = $10^{1,5546}$ = 35,8600 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,5546×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,2054

En = $10^{1,2054}$ = 16,0500 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 16,0500× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 90,5811 J/cm^2 = 21,6494 cal/cm^2

- BUS-0221

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 27,0835) = 1,4124

Ia = $10^{1,4124}$ = 25,8445 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,4124×1,1) + (0,0011 × 153)
= 1,0490

En = $10^{1,0490}$ = 11,1957 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 11,1957× (0,05/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$
= 7,8981 J/cm^2 = 1,8877 cal/cm^2

- BUS-0254

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 27,4199) = 1,4176

Ia $= 10^{1,4176} = 26,1601$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,4176 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 1,0548$

En $= 10^{1,0548} = 11,3461$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 11,3461 \times (1,168/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 187,1192$ J/cm^2 = 44,7226 cal/cm^2

- Bus15

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 20,3592) = 1,2905$

Ia $= 10^{1,2905} = 19,5223$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,2905 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 0,9150$

En $= 10^{0,9150} = 8,2237$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 8,2237 \times (0,05/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 5,8015$ J/cm^2 = 1,3866 cal/cm^2

- Bus9

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 27,0620) = 1,4120$

Ia $= 10^{1,4120} = 25,8244$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,4120 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 1,0486$

En $= 10^{1,0486} = 11,1861$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 11,1861 \times (0,05/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 7,8914$ J/cm^2 = 1,8861 cal/cm^2

- BOC-PLN

lg Ia $= 0,00404 + (0,983 \times \lg 20,9266) = 1,3023$

Ia $= 10^{1,3023} = 20,0571$ kA

lg En $= -0,555 - 0,113 + (1,3023 \times 1,1) + (0,0011 \times 153)$

$= 0,9280$

En $= 10^{0,9280} = 8,4718$ J/cm^2

E $= 4,184 \times 1 \times 8,4718 \times (0,4/0,2) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

$= 47,8121$ J/cm^2 = 11,4272 cal/cm^2

- BOC-PLN-2

lg Ia = 0,00404 + (0,983 × lg 20,9266) = 1,3023

Ia = $10^{1,3023}$ = 20,0571 kA

lg En = -0,555 – 0,113 + (1,3023×1,1) + (0,0011 × 153)

= 0,9280

En = $10^{0,9280}$ = 8,4718 J/cm^2

E = 4,184 × 1 × 8,4718× (0,4/0,2) × $\left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right)$

= 47,8121 J/cm^2 = 11,4272 cal/cm^2

4.5. Perbandingan Nilai Energi Busur Api

Perbedaan energi busur api dari keadaan semula dan setelah di beri pentanahan dengan resistansi dapat dilihat dalam Tabel 4.3 dan Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Energi busur api data eksisting

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	En (cal/cm^2)
1APD-MCC-1	3,3	16,80	0,40	10,2712
1APD-MCC-1new	3,3	16,80	0,40	10,2712
1APD-MCC-2	3,3	16,80	0,40	10,2712
BUS-0076	3,3	15,76	0,40	9,5879
BUS-0078	3,3	15,76	0,40	9,5879
BUS-0080	3,3	15,74	0,40	9,5736
BUS-0081	3,3	15,74	0,40	9,5736
BUS-0082	3,3	15,79	0,40	9,6090
BUS-0083	3,3	15,78	0,40	9,6044
BUS-0084	3,3	15,78	0,40	9,6044
Bus17	3,3	15,77	0,40	9,5976
Bus20	3,3	15,77	0,40	9,5977
Bus22	3,3	15,76	0,40	9,5864
Bus4	6,3	2,89	0,20	0,8729
11 kV BUS-1	11	33,54	0,91	56,4240
11 kV BUS-2	11	32,31	2,84	168,0627
11 kV BUS-3	11	38,22	4,51	320,3811

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	En (cal/cm^2)
11 kV BUS-4	11	38,22	9,41	668,5433
BUS-0152	11	27,30	0,05	2,4696
BUS-0212	11	33,29	0,40	24,4865
BUS-0213	11	36,67	0,40	27,1857
BUS-0214	11	30,17	2,45	135,0029
BUS-0215	11	37,59	4,28	298,5015
BUS-0216	11	37,79	0,40	28,0832
BUS-0221	11	27,08	0,05	2,4487
BUS-0254	11	27,42	1,17	58,0132
Bus15	11	20,36	0,05	1,7987
Bus9	11	27,06	0,05	2,4466

Energi busur api pada keadaan awal di beberapa bus masih tinggi. Hal ini disebabkan karena nilai arus gangguan yang masih besar. Selain itu koordinasi proteksi yang belum baik juga akan berakibat pada waktu terjadinya busur yang lebih lama.

Setelah di *resetting* rele pengamannya akan terdapat perbedaan waktu busur. Ada beberapa bus yang mengalami peningkatan waktu, namun ada pula yang sebaliknya. Hal ini mengakibatkan perubahan nilai dari energi busur api. Untuk bus yang mengalami peningkatan waktu akan mengalami kenaikan energi busur api. Walaupun begitu, hal ini diperbolehkan karena akan menunjukan nilai energi busur api yang sebenarnya sebab sistem koordinasi proteksi yang baik merupakan prasyarat dari analisa energi busur api.

Tabel 4.4 Energi busur api data *resetting*

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	En (cal/cm^2)
1APD-MCC-1	3,3	16,80	0,40	7,9181
1APD-MCC-1new	3,3	16,80	0,40	7,9181
1APD-MCC-2	3,3	16,80	0,40	7,9181
BUS-0076	3,3	15,76	0,40	7,3914
BUS-0078	3,3	15,76	0,40	7,3914

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	En (cal/cm^2)
BUS-0081	3,3	15,74	0,40	7,3803
BUS-0082	3,3	15,79	0,40	7,4076
BUS-0083	3,3	15,78	0,40	7,4040
BUS-0084	3,3	15,78	0,40	7,4040
Bus17	3,3	15,77	0,40	7,3988
Bus20	3,3	15,77	0,40	7,3989
Bus22	3,3	15,76	0,40	7.3902
Bus4	6,3	2,89	0,20	0,6729
11 kV BUS-1	11	33,54	0,91	43,2882
11 kV BUS-2	11	32,31	2,84	129,7383
11 kV BUS-3	11	38,22	4,51	247,0596
11 kV BUS-4	11	38,22	9,41	515,4836
BUS-0152	11	27,30	0,05	1,9038
BUS-0212	11	33,29	0,40	18,8767
BUS-0213	11	36,67	0,40	20,9575
BUS-0214	11	30,17	2,45	103,9427
BUS-0215	11	37,59	4,28	230,2827
BUS-0216	11	37,79	0,40	21,6494
BUS-0221	11	27,08	0,05	1,8877
BUS-0254	11	27,42	1,17	44,7657
Bus15	11	20,36	0,05	1,3866
Bus9	11	27,06	0,05	1,8861

Tabel 4.5 Energi busur api data *resetting* dan penambahan rele differensial

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	En (cal/cm^2)
1APD-MCC-1	3,3	16,80	0,40	7,9181
1APD-MCC-1new	3,3	16,80	0,40	7,9181

ID Bus	Tegangan (kV)	Ibf (kA)	FCT (detik)	En (cal/cm^2)
1APD-MCC-2	3,3	16,80	0,40	7,9181
BUS-0076	3,3	15,76	0,40	7,3914
BUS-0078	3,3	15,76	0,40	7,3914
BUS-0080	3,3	15,74	0,40	7,3803
BUS-0081	3,3	15,74	0,40	7,3803
BUS-0082	3,3	15,79	0,40	7,4076
BUS-0083	3,3	15,78	0,40	7,4040
BUS-0084	3,3	15,78	0,40	7,4040
Bus17	3,3	15,77	0,40	7,3988
Bus20	3,3	15,77	0,40	7,3989
Bus22	3,3	15,76	0,40	7,3902
Bus4	6,3	2,89	0,20	0,6729
11 kV BUS-1	11	33,54	0,04	1,9028
11 kV BUS-2	11	32,31	0,04	1,8273
11 kV BUS-3	11	38,22	0,04	2,1912
11 kV BUS-4	11	38,22	0,04	2,1912
BUS-0152	11	27,30	0,05	1,9038
BUS-0212	11	33,29	0,4	18,8767
BUS-0213	11	36,67	0,4	20,9575
BUS-0214	11	30,17	0,04	1,6970
BUS-0215	11	37,59	0,04	2,1522
BUS-0216	11	37,79	0,4	21,6494
BUS-0221	11	27,08	0,05	1,8877
BUS-0254	11	27,42	0,04	1,5305
Bus15	11	20,36	0,05	1,3866
Bus9	11	27,06	0,05	1,8861

4.6. Perhitungan *Protection Boundary*

Nilai energi busur api yang telah didapat akan digunakan untuk menentukan jarak aman untuk bekerja dalam lingkungan bertegangan.

Perhitungan ini menggunakan *flash-protection boundary* yang berdasarkan pada insiden energi di 5,0 J/cm^2. Rumus yang digunakan ialah:

$$D_B = \left[4{,}184 \times C_f \times E_n \left(\frac{t}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^x}{E_B}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

- Bus 1APD-MMC-1

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}8702 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 6385,1301 mm

- Bus Bus 1APD-MMC-1new

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}8702 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 6385,1301 mm

- Bus 1APD-MMC-2

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}8702 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 6385,1301 mm

- Bus-0076

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4797 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5948,9677 mm

- Bus-0078

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4797 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5948,9677 mm

- Bus-0080

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4715 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5939,8344 mm

- Bus-0081

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4715 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5939,8344 mm

- Bus-0082

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4717 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5962,3976 mm

- Bus-0083

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4891 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5959,4488 mm

- Bus-0084

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4891 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5959,4488 mm

- Bus17

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4852 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5955,1454 mm

- Bus20

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4852 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5955,1832 mm

- Bus22

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 5{,}4788 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 5947,9906 mm

- Bus4

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 0{,}9978 \left(\frac{0{,}2}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 506,7705 mm

- 11 kV BUS-1

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 14{,}1064 \left(\frac{00{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1474,8612 mm

- 11 kV BUS-2

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 13{,}5469 \left(\frac{0{,}04}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1414,7691 mm

- 11 kV BUS-3

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 16{,}2448 \left(\frac{0{,}04}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1705,0992 mm

- 11 kV BUS-4

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 16{,}2448 \left(\frac{0{,}04}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1705,0992 mm

- BUS-0152

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 11{,}2915 \left(\frac{0{,}05}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1475,7129 mm

- BUS-0212

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 13{,}9945 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 15593,5080 mm

- BUS-0213

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 15{,}5371 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 17362,6851 mm

- BUS-0214

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 12{,}5811 \left(\frac{2{,}45}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 90143,3202 mm

- BUS-0215

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 15{,}9554 \left(\frac{4{,}27}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 203750,8756 mm

- BUS-0216

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 16{,}0500 \left(\frac{0{,}4}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 17952,0544 mm

- BUS-0221

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 11{,}1957 \left(\frac{0{,}05}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1462,8542 mm

- BUS-0254

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 11{,}3462 \left(\frac{1{,}16}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 37838,8707 mm

- Bus15

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 8{,}2238 \left(\frac{0{,}05}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1065,3705 mm

- Bus9

$$D_B = \left[4{,}184 \times 1 \times 11{,}1862 \left(\frac{0{,}05}{0{,}2}\right)\left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0{,}973}}$$

= 1461,5670 mm

Protection boundary merupakan batasan daerah kerja untuk pekerjaan di lingkungan bertegangan. Setiap daerah memiliki risiko yang berbeda. Dengan penurunan energi busur api, tingkat risiko bahaya juga berkurang dan jarak dari pekerja ke peralatan juga semakin dekat. Tetapi perlu diingat risiko yang dimaksud berasal dari kejadian gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Dengan mengetahui risiko bahaya dari pekerjaan di daerah bertegangan pekerja dapat menggunakan peralatan yang sesuai dan pencegahan – pencegahan yang perlu di ambil.

4.7. Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE)

Pengelompokkan kategori energi busur api dilakukan setelah mendapatkan nilai *incident energy* pada setiap bus. Pengelompokan tersebut bertujuan untuk menentukan perlengkapan keselamatan diri yang harus dipakai oleh pekerja saat berada di area tersebut. Berikut merupakan *personal protective equipment* (PPE) sesuai standar NFPA 70E [11].

4.7.1 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 1

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-1, BUS-0212 dan 1APD-MCC-1 berikut tabel besar energi *arc flash* dan *personal protective equipment* yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.6 *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 1

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
11 kv BUS-1	1,9028	Kategori 0	• *Cotton Undergarment* • *Long Sleeved Shirt* • *Long Pants* • *Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves*

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
BUS-0212	18,8767	Kategori 3	• *Cotton Underwear* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* • *Arc Rated Coveralls* • *Arc Rated Suited Jacket (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Pants (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Hood (25 Cal)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Arc Rated Leather Gloves* • *Leather Shoes*
1APD-MCC-1	7,9181	Kategori 2	• *Cotton Undergarment* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Sleeved Shirt and Long Pants* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves and Shoes*

4.7.2 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 2

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-2, dan BUS-0214 berikut tabel besar energi *arc flash* dan *personal protective equipment* yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.7 Personal Protective Equipment (PPE) pada Tipikal 2

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
11 kv BUS-2	1,8273	Kategori 0	• *Cotton Undergarment* • *Long Sleeved Shirt* • *Long Pants* • *Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves*
BUS-0214	1,6970	Kategori 0	• *Cotton Undergarment* • *Long Sleeved Shirt* • *Long Pants* • *Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves*

4.7.3 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 3

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-4, 11 kv BUS-3, BUS-0213 dan 1APD-MCC-1new berikut tabel besar energi *arc flash* dan *personal protective equipment* yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.8 Personal Protective Equipment (PPE) pada Tipikal 3

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
11 kv BUS-4	2,1912	Kategori 1	• *Cotton Undergarment* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt (FR Coveralls)* • *Arc Rated Long Pants (FR Coveralls)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves and Shoes*

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
11 kv BUS-3	2,1912	Kategori 1	• *Cotton Undergarment* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt (FR Coveralls)* • *Arc Rated Long Pants (FR Coveralls)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves and Shoes*
BUS-0213	20,9575	Kategori 3	• *Cotton Undergarment* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* • *Arc Rated Coveralls* • *Arc Rated Suited Jacket (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Pants (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Hood (25 Cal)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Arc Rated Leather Gloves* • *Leather Shoes*
1APD-MCC-1new	7,9181	Kategori 2	• *Cotton Undergarment* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Sleeved Shirt and Long Pants* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves and Shoes*

4.7.4 Pemilihan *Personal Protective Equipment* (PPE) pada Tipikal 4

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-4, 11 kv BUS-3, BUS-0216, BOC-PLN-2, Bus7 dan Bus4 berikut tabel besar energi *arc flash* dan *personal protective equipment* yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.9 Personal Protective Equipment (PPE) pada Tipikal 4

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
11 kv BUS-4	2,1912	Kategori 1	• *Cotton Undergarment* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt (FR Coveralls)* • *Arc Rated Long Pants (FR Coveralls)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves and Shoes*
11 kv BUS-3	2,1912	Kategori 1	• *Cotton Undergarment* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt (FR Coveralls)* • *Arc Rated Long Pants (FR Coveralls)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves and Shoes*

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
BUS-0216	21,6494	Kategori 3	• *Cotton Undergarment* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* • *Arc Rated Coveralls* • *Arc Rated Suited Jacket (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Pants (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Hood (25 Cal)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Arc Rated Leather Gloves* • *Leather Shoes*
BOC-PLN-2	11,4274	Kategori 3	• *Cotton Undergarment* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* • *Arc Rated Coveralls* • *Arc Rated Suited Jacket (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Pants (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Hood (25 Cal)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Arc Rated Leather Gloves* • *Leather Shoes*

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	PPE
Bus7	11,4274	Kategori 3	• *Cotton Undergarment* • *Short Sleeved "T" Shirt* • *Arc Rated Long Sleeved Shirt and Long Pants* • *Arc Rated Coveralls* • *Arc Rated Suited Jacket (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Pants (25 Cal)* • *Arc Rated Suited Hood (25 Cal)* • *Hard Hat and Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Arc Rated Leather Gloves* • *Leather Shoes*
Bus4	0,6729	Kategori 0	• *Cotton Undergarment* • *Long Sleeved Shirt* • *Long Pants* • *Safety Glasses* • *Hearing Protection* • *Leather Gloves*

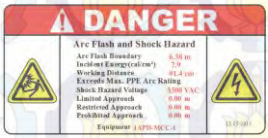
4.8. Pembuatan Label untuk tiap-tiap Tipikal

Selain *personel protective equipment* (PPE), pada bus yang beresiko muncul energi busur api juga diberi label arc flash. Berikut merupakan label untuk tiap-tiap tipikal.

4.8.1 Pembuatan Label pada Tipikal 1

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-1, BUS-0212 dan 1APD-MCC-1 berikut tabel besar energi *arc flash* dan label yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.10 Label pada Tipikal 1

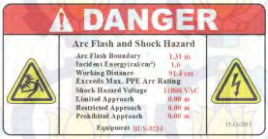
ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
11 kv BUS-1	1,9028	Kategori 0	1,47 m	
BUS-0212	18,8767	Kategori 3	15,59 m	
1APD-MCC-1	7,9181	Kategori 2	6,38 m	

4.8.2 Pembuatan Label pada Tipikal 2

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-2, dan BUS-0214 berikut tabel besar energi *arc flash* dan label yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.11 Label pada Tipikal 2

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
11 kv BUS-2	1,8273	Kategori 0	1,47 m	

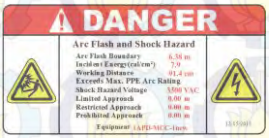
ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
BUS-0214	1,6970	Kategori 0	1,31 m	

4.8.3 Pembuatan Label pada Tipikal 3

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-4, 11 kv BUS-3, BUS-0213 dan 1APD-MCC-1new berikut tabel besar energi *arc flash* dan label yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.12 Label pada Tipikal 3

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
11 kv BUS-4	2,1912	Kategori 1	1,70 m	
11 kv BUS-3	2,1912	Kategori 1	1,70 m	
BUS-0213	20,9575	Kategori 3	17,36 m	

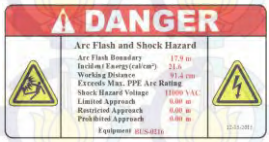
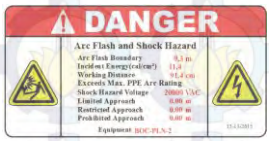
ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
1APD-MCC-1new	7,9181	Kategori 2	6,38 m	

4.8.4 Pembuatan Label pada Tipikal 4

Pada tipikal 1 ini terdapat tiga bus utama yaitu 11 kv BUS-4, 11 kv BUS-3, BUS-0216, BOC-PLN-2, Bus7 dan Bus4 berikut tabel besar energi *arc flash* dan label yang sesuai dengan katagorinya pada bus tersebut.

Tabel 4.13 Label pada Tipikal 4

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
11 kv BUS-4	2,1912	Kategori 1	1,70 m	
11 kv BUS-3	2,1912	Kategori 1	1,70 m	

ID Bus	En (cal/cm^2)	Kategori	Arc Flash Boundary (m)	Label
BUS-0216	21,6494	Kategori 3	17,95 m	
BOC-PLN-2	11,4274	Kategori 3	9,3 m	
Bus7	11,4274	Kategori 3	9,3 m	
Bus4	0,6729	Kategori 0	0,5 m	

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut merupakan kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan pada tugas akhir.

1. Berdasarkan hasil simulasi dengan *software ETAP*, pada kurva koordinasi proteksi *eksisting* masih terdapat beberapa *setting* yang harus diperbaiki agar waktu kerja rele terkoordinasi dengan baik.
2. Pada koordinasi proteksi *eksisting* masih terdapat beberapa bus yang memiliki kategori bahaya melebihi batas yang diijinkan (*>4: exceeds max. PPE arc Rating*) yaitu bus BUS-0254, BUS-0215, BUS-0214, 11 kV BUS-4, 11 kV BUS-3, 11 kV BUS-2, dan 11 kV BUS-4. Kondisi tersebut membahayakan bagi pekerja saat melakukan *maintenance* pada bus tersebut karena tidak ada *Personel Protective Equipment* (PPE) yang mampu melindungi jika terjadi gangguan hubung singkat sehingga nilai energi busur api harus diturunkan.
3. Berikut merupakan nilai energi busur api setelah dilakukan *resetting* rele pengaman yang menunjukkan adanya Bus yang kategori energi busur api melebihi kategori 4.

Tabel 5.1 Hasil nilai energi busur api setelah *resetting*

No.	BUS ID	*Resetting*	
		Incident Energy (cal/cm^2)	Hazard Category
1.	BUS-0254	44,7657	*Exceed*
2.	BUS-0215	230,2827	*Exceed*
3.	BUS-0214	103,9427	*Exceed*
4.	11 kV BUS-4	515,4836	*Exceed*
5.	11 kV BUS-3	247,0596	*Exceed*
6.	11 kV BUS-2	129,7383	*Exceed*
7.	11 kV BUS-1	43,2882	*Exceed*

4. Berikut merupakan nilai energi busur api setelah dilakukan *resetting* rele pengaman dan penambahan rele differensial menunjukkan tidak ada Bus yang kategori energi busur api melebihi kategori 4

Tabel 5.2 Hasil nilai energi busur api setelah *resetting* dan penambahan rele differensial

No.	BUS ID	*Resetting*	
		Incident Energy (cal/cm^2)	Hazard Category
1.	BUS-0254	1,5305	Category 0
2.	BUS-0215	2,1522	Category 1
3.	BUS-0214	1,6970	Category 0
4.	11 kV BUS-4	2,1912	Category 1
5.	11 kV BUS-3	2,1912	Category 1
6.	11 kV BUS-2	1,8273	Category 0
7.	11 kV BUS-1	1,9028	Category 0

5. Berdasarkan *hazard category* pada table 5.1 maka *Personel Protective Equipment* (PPE) yang sesuai standar NFPA 70E sudah bisa ditentukan bagi pekerja saat melakukan *maintenance* pada masing-masing bus tersebut sehingga pekerja akan lebih aman.

5.2 Saran

1. Hasil *resetting* rele pengaman pada tugas akhir ini bisa menjadi pertimbangan bagi industri terkait saat melakukan perbaikan kurva koordinasi rele.
2. Pada bus dengan level tegangan menengah (3,3kV , 6,6kV , 11kV, 20kV) di PT. Linde Indonesia Gresik disarankan untuk memasang rele *differential* guna memperkecil nilai energi busur api agar sesuai dengan batas yang diijinkan oleh standar NFPA 70E.

3. Pada masing-masing bus disarankan untuk ditempel label peringatan bahaya busur api dan bagi pekerja sebaiknya selalu memakai *personel protective equipment* (PPE) yang sesuai *hazard category* ketika melakukan *maintenance*.

DAFTAR PUSTAKA

[1]. IEEE Std. 1584-2002. "*Guide for Performing Arc flash Hazard Calculations*".

[2]. NFPA 70E., *"Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces 2009 Edition",* NFPA 70E-2009.

[3]. IEEE Std 242-2001, *"IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems",* The Institute of Electrical and electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001.

[4]. Lazar, I., *"Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants",* McGraw-Hill Companies, Inc, USA, Ch. 6, 1980

[5]. IEEE Std 1584-2002, *"IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation",* The Institute of Electrical and electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001

[6]. P.M Anderson, *"Power System Protection,"* McGraw-Hill, 1998.

[7]. Wahyudi, "Diktat Kuliah Sistem Pengaman", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014

[8]. Turan Gonen, *"Modern Power System Analysis,"* USA, 1988

[9]. David D. Shipp, P.E. David M. Wood, "*Innovative Techniques for Mitigating Arc Flash Exposure,"* Eaton Corporation Warrendale, PA 15086

[10]. Parsons Antony, *"Arc Flash Mitigation,"* Schneider Electric White Paper, 2013.

BIOGRAFI PENULIS

Penulis memiliki nama Yahya Nurhidayat, lahir di Kediri pada tanggal 31 Juli 1994. Anak dari Suyanto dan Suprihatin. Saya anak kedua dari dua bersaudara. Hobi saya adalah bermain futsal. Awal pendidikan saya dimulai pada tahun 1999 di TK Al-Hidayah Plosokerep Blitar, selanjutnya melanjutkan di SDN Kepanjen Kidul 3 Blitar pada tahun 2000-2006. Selepas masa SD, saya melanjutkan ke SMPN 1 Blitar pada tahun 2006-2009. Pada tahun 2009-2012 melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Blitar. Setelah lulus SMA, saya melanjutkan pendidikan di S1 teknik Elektro pada prodi Teknik Sistem Tenaga sampai sekarang. Penulis dapat di hubungi di alamat email yahyanurh@gmail.com.